

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HIDROCICLÓN A NIVEL LABORATORIO

DUVÁN AUGUSTO PEDRAZA HERNÁNDEZ



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA

TUNJA

2018

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HIDROCICLÓN A NIVEL LABORATORIO

DUVÁN AUGUSTO PEDRAZA HERNÁNDEZ

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero metalúrgico



Directora:

SANDRA PATRICIA PÉREZ VELÁSQUEZ

Ingeniera Metalúrgica

Doctora en Ingeniería

Codirector:

CARLOS ALBERTO SANDOVAL FONSECA

Ingeniero Metalúrgico

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA

TUNJA

2018

Nota de aceptación

Director(a) de tesis

Director(a) de escuela

Jurado

Jurado

Tunja, 08 de marzo de 2018

La autoridad científica de la facultad de ingeniería reside en ella misma, por lo tanto no responde por las opiniones expresadas en este proyecto de grado.

“Se autoriza su reproducción indicando necesariamente su origen”

DEDICATORIA

Quiero agradecer a Dios primeramente y dedicar este proyecto a mi madre María Hernández por su esfuerzo diario y por formarme como persona, a mi abuela María del Carmen; a mi hermano Jairo por su apoyo incondicional y por la confianza depositada en mí.

A Fernanda por siempre brindarme tanto su cariño como su apoyo. A María Angélica que ya pronto verá cumplido el sueño de ser abogada y por supuesto a mi ahijado Juan Martín quien me alegra los días con sus ocurrencias.

A mi compañera de vida Julieth Jiménez con quien comparto mis logros, alegrías, tristezas y la felicidad que representa ver florecer una nueva vida. Finalmente a mi hija que viene en camino y quien es para mí, desde ahora, un motivo más para salir adelante.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de la manera más sincera a la doctora Sandra Patricia Pérez y a las ingenieras Claudia Patricia Molina y Claudia Inés Sánchez por los aportes, las recomendaciones y la ayuda ofrecida en el proceso de realización de este proyecto.

Al ingeniero Carlos Sandoval Fonseca por el interés, la asesoría, el tiempo y la paciencia brindada durante el desarrollo del proyecto.

A la ingeniera María Luisa Pedraza por la colaboración brindada.

A los ingenieros Pedro Jaimes y Vicente Cárdenas por su colaboración.

A los señores Oscar Gómez, Jairo Valbuena y Oscar López quienes contribuyeron de gran manera a este fin.

Finalmente a mis compañeros Jeison Medina, Nicolás Rojas y Cristian Cruz por la ayuda ofrecida, así como a todas aquellas personas que de una u otra forma fueron partícipes de este proyecto.

CONTENIDO

RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	13
1.1 OBJETIVO GENERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 CLASIFICACIÓN	14
2.2 EL HIDROCICLÓN	15
2.2.1 Funcionamiento.	16
2.2.2 Patrones de flujo	17
2.2.3 Eficiencia y recuperación de un hidrociclón.	21
2.2.4 Agudeza de separación.	22
2.2.5 Caída de presión	23
2.3 DISEÑO DE UN HIDROCICLÓN	25
2.3.1 Variables geométricas y parámetros básicos para un ciclón estándar	25
2.3.2 Variables de operación	32
2.4 APLICACIONES DEL HIDROCICLÓN	36
2.4.1 Clarificación.	36
2.4.2 Espesado	37
2.4.3 Clasificación de los sólidos según tamaño	38
3. METODOLOGÍA	41
3.1 ESTADO DEL ARTE	41
3.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HIDROCICLÓN	44
3.2.1 Dimensionamiento del hidrociclón	44
3.2.2 Construcción del hidrociclón	48
3.2.3 Diseño y construcción del montaje experimental.	51
3.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	52
4 RESULTADOS	55
4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS	57

5. CONCLUSIONES	61
6. RECOMENDACIONES	62
BIBLIOGRAFÍA E INFOGRAFÍA.....	63
ANEXOS.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Hidrociclón (a) Componentes principales (b) Dirección de los flujos principales.....	15
Figura 2. Trayectoria teórica de la pulpa dentro del hidrociclón.....	17
Figura 3. Distribución de la velocidad tangencial en un hidrociclón.	18
Figura 4. Distribución de la velocidad axial en un hidrociclón.....	19
Figura 5. Distribución de la velocidad radial en un hidrociclón.	20
Figura 6. Curva de rendimiento corregida y sin corregir.	21
Figura 7. Efecto de la presión en la capacidad y el punto de corte del hidrociclón.	24
Figura 8. Variables Geométricas de un Hidrociclón.	26
Figura 9. Tipos de entrada: (a) Tangencial, (b) Involuta.	28
Figura 10. Tipos de descarga (a) Rope y (b) Spray.	30
Figura 11. Descarga Combinada.	31
Figura 12. Clasificador hidrociclón utilizado en un circuito cerrado de molienda. ...	38
Figura 13. Utilización de un hidrociclón en un sistema de filtro de banda horizontal.	39
Figura 14. Planta piloto de separación de laminillo aceitoso.	40
Figura 15. Dimensiones del hidrociclón (cm).	46
Figura 16. Vistas del hidrociclón. (a) Vista superior, (b) Corte lateral superior y (c) Vista inferior.	47
Figura 17. Construcción de moldes.	48
Figura 18. Corte y pulido de láminas de acrílico.	49
Figura 19. Termoformado de láminas.	49
Figura 20. Corte a laser de uniones.....	50
Figura 21. Unión de piezas.	50
Figura 22. Cuerpo del hidrociclón.	51
Figura 23. Diagrama de montaje experimental.	52
Figura 24. Toma de densidades.	53
Figura 25. Tamizado de muestras.	54
Figura 26. Diagrama de flujo del proceso.	54
Figura 27. Muestras de carbón (a) Underflow, (b) Overflow.	56
Figura 28. Curva de rendimiento.....	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Transición entre la descarga tipo Rope y en Spray.	31
Tabla 2. Relaciones geométricas del hidrociclón.	45
Tabla 3. Características de la electrobomba.	45
Tabla 4. Densidades experimentales.	55
Tabla 5. Distribución granulométrica de las muestras.	56
Tabla 6. Porcentaje de sólidos y relación de dilución.	57
Tabla 7. Datos para la construcción de la curva de rendimiento.	58
Tabla 8. Valores de d25, d50 y d75.	59

RESUMEN

El presente trabajo expone los resultados del diseño de un hidrociclón basándose en algunas relaciones geométricas expuestas por Rietema y su construcción a partir del proceso de termoformado de polimetilmetacrilato. Se realizó la puesta en marcha del equipo con una pulpa de baja concentración de sólidos y a partir de la toma de densidades y el tamizado de muestras tanto de la alimentación como del underflow y el overflow, se determinó la curva de rendimiento encontrando una eficiencia del 61,2%. Las distintas pruebas realizadas mostraron que el hidrociclón opera eficientemente con una concentración de sólidos de 11,65% y una presión de entrada de mínimo 5 psi. Así mismo se determinó que la cantidad de agua mínima para la operación del equipo son 70 litros, esto con el fin de que no se presenten caídas de presión que ocasionen una clasificación ineficiente. Además, se verificó que la presión de entrada se encuentra directamente relacionada con el tipo de descarga y por ende con la eficiencia de clasificación.

Palabras Clave: Hidrociclón, Curva de rendimiento, Eficiencia, Presión de entrada.

INTRODUCCIÓN

Dentro del procesamiento de minerales, el hidrociclón desempeña un papel importante industrialmente y aunque parece un equipo simple, presenta un sistema de funcionamiento un poco complejo que sirve para la recuperación y selección de minerales¹; además tiene ciertas ventajas frente a otros equipos de clasificación, siendo una de las más relevantes los grandes volúmenes de pulpa que puede procesar así como los bajos costos de mantenimiento y la alta eficiencia de separación.

Por estos motivos principalmente, se le han dado varias aplicaciones dentro de las cuales se encuentran la clarificación de líquidos, el espesamiento de suspensiones, el lavado de sólidos, la clasificación de sólidos por tamaño, la clasificación de sólidos según la densidad o la forma de las partículas y la separación de dos líquidos inmiscibles, entre otros².

Debido a lo anterior, investigadores como Arterburn³, han tratado de establecer condiciones de operación óptimas y actualmente, estos estudios están enfocados en mejoras de diseño, variación de la geometría y materiales de construcción. Para la aplicación de estas mejoras los modelos transparentes han sido la mejor opción ya que es posible comparar los resultados con simuladores evaluando el rendimiento del equipo⁴.

En Colombia el hidrociclón es motivo de investigación frecuentemente en diferentes universidades y en la industria su uso está comúnmente centrado en el beneficio de carbones a través del lavado de los mismos. Teniendo en cuenta lo anterior se diseñó y se construyó un hidrociclón en polimetilmetacrilato (PMMA) tomando como referencia las relaciones geométricas expuestas por diferentes autores, entre ellos Rietema y utilizando como medio sólido carbón con la finalidad de lograr una separación de sólidos por tamaño.

¹ ALVARADO, María. VANEGAS, Marley. VALENCIA, Guillermo. Análisis estadístico de un circuito hidrociclónico para el beneficio de carbones. En: Scielo [base de datos en línea]. Vol. 14 (junio, 2016) p. 53 – 61 [citado en 2 de Noviembre de 2017] Disponible en Prospectiva.

² SVAROVSKY, Ladislav. Hydrocyclones. En: Solid – Liquid Separation. 4 ed. Pardubice: Butterworth-Heinemann, 2000. p. 203.

³ ARTERBURN, Richard A. The sizing and selection of hydrocyclones [En línea]. <https://www.911metallurgist.com/wp-content/uploads/2016/02/sizing-select_cyclones.pdf> [Fecha de consulta: 09 de agosto de 2017]

⁴ BOUSO, Juan Luis. Nuevas tendencias de clasificación en el procesamiento de minerales [En línea]. <<http://eralchile.com/pdf/17.pdf>> [Fecha de consulta: 07 de octubre de 2016]. p. 5.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y poner en funcionamiento un hidrociclón para uso educativo en el laboratorio de preparación mecánica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir un hidrociclón a partir de un material polimérico de manera que cumpla con los requerimientos teóricos para un funcionamiento adecuado.
- Realizar ensayos preliminares de laboratorio en el hidrociclón.
- Determinar la eficiencia de separación del hidrociclón construido.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CLASIFICACIÓN

Es un proceso mediante el cual se busca separar partículas en dos o más partes dependiendo de su tamaño. Las operaciones de clasificación pueden ser efectuadas tanto en seco como por vía húmeda, lo que depende a su vez del tamaño del material, de sus propiedades así como del tratamiento que reciba en operaciones posteriores. La clasificación abarca una gran cantidad de procesos que son desarrollados de manera distinta pero que conllevan a un mismo fin el cual es la separación de partículas por tamaños⁵.

La clasificación por vía húmeda es definida como la separación de partículas sólidas de una mezcla de sólidos y líquido. Dicho proceso tiene como base la velocidad con la cual caen las partículas a través del medio, lo que significa que no solo se lleva a cabo teniendo en cuenta el tamaño de las partículas sino también su gravedad específica. En general los productos resultantes son: una fracción que contiene material grueso, y una fracción restante la cual contiene material fino junto con la parte restante de líquido.

Para el caso del procesamiento de minerales este es el medio utilizado habitualmente y el procedimiento se aplica a partículas que se consideran muy finas como para que sean separadas por un medio seco como el cribado⁶.

Según describe Drzymala⁷, El proceso de clasificación de partículas que es conducido en un medio través de un clasificador se puede llevar a cabo mediante el movimiento de partículas en espiral. Este tipo de movimiento tiene lugar en ciclones de aire, centrifugadoras e hidrociclones y es el resultado de la entrada tangencial de la alimentación mediante la aplicación de presión al clasificador.

Como consecuencia del movimiento en espiral, las partículas se someten a la acción de una fuerza centrífuga la cual es la principal fuerza separadora.

⁵ Fundamentos teóricos de clasificación [En línea]. <<https://es.slideshare.net/Gallas190987/2-fundamentos-teoricos-de-clasificacin>> [Fecha de consulta: 22 de febrero de 2017]

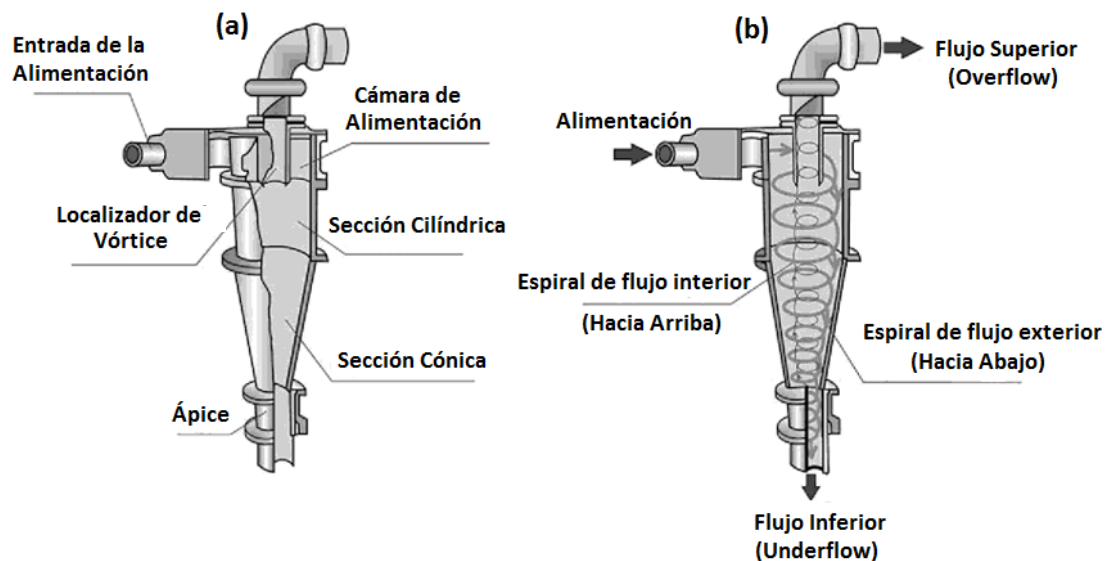
⁶ PERRY, Robert H. Editado por Antonio García Brage. Equipos y Operaciones Sólido – Sólido. En: Manual del ingeniero químico. 7 ed. Vol 3. Madrid: McGraw-Hill, 2001. p. 19-29.

⁷ DRZYMALA, Jan. Hydraulic and air separation. En: Mineral Processing, Foundations of theory and practice of minerallurgy. Wroclaw: Wroclaw University of Technology, 2007. p. 178.

2.2 EL HIDROCICLÓN

El hidrociclón, comúnmente abreviado ciclón, según expone Wills⁸, es un equipo de clasificación de partículas el cual es utilizado en operación continua. Para la clasificación se hace necesario el uso de la fuerza centrífuga que acelera la velocidad de asentamiento de las partículas. Ver figura 1.

Figura 1. Hidrociclón (a) Componentes principales (b) Dirección de los flujos principales.



Fuente: WILLS, B.A. Classification. En: Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 8 ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2016. p. 204.

Es uno de los clasificadores más importantes dentro de la industria de procesamiento de minerales, presentando además variadas aplicaciones como lo son el espesado, deslamado, fraccionamiento, recuperación de líquido, circuitos cerrados de molienda, entre otros.

⁸ WILLS, B.A. Classification. En: Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 8 ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2016. p. 203.

Los ciclones constan básicamente de una sección cónica abierta, la cual está unida a un cilindro que a su vez tiene una entrada tangencial en el borde superior. La parte superior de la sección cilíndrica se encuentra cerrada con una placa por medio de la cual pasa un tubo de desbordamiento que está ubicado axialmente, siendo denominado localizador del vórtice (vortex finder). La parte inferior del ciclón en donde se efectúa la descarga del material es llamada ápice (apex).

Este tipo de equipos originalmente fueron diseñados para realizar la separación sólido – líquido pero actualmente son utilizados para separaciones sólido - sólido, líquido – líquido y gas – líquido.

El variado uso del hidrociclón se da principalmente debido a la simplicidad de su diseño, el bajo costo de fabricación y su alta capacidad con relación a su tamaño⁹.

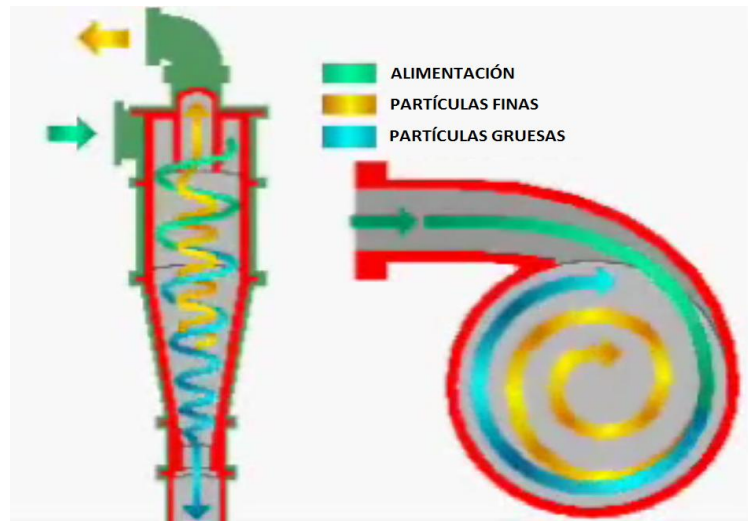
2.2.1 Funcionamiento. El hidrociclón funciona a partir de la entrada de la pulpa mediante la aplicación de presión a través de la sección de alimentación la cual está unida tangencialmente a la sección cilíndrica. La fuerza centrífuga tiene un papel muy importante dentro del funcionamiento del equipo ya que debido a su acción las partículas gruesas se proyectan hacia las paredes inferiores de la sección cónica mediante una trayectoria helicoidal donde luego descienden y son colectadas en el ápice.

El paso de la pulpa a la sección cónica del ciclón origina un efecto de estrangulación generando así la división de dicha pulpa en dos flujos como se observa en la figura 2. Uno de los flujos contiene las partículas gruesas las cuales son concentradas en las paredes del ciclón y extraídas a través de la sección de descarga situada en la parte inferior del equipo. En el centro del ciclón se produce un fuerte vórtice y la baja presión impulsa la fase fluida junto con las partículas finas hacia arriba, siendo estas expulsadas a través del derrame.

Como se mencionó anteriormente, la gravedad específica desempeña un papel muy importante dentro del proceso de clasificación en general y en el proceso efectuado en el hidrociclón debido a que controla la consistencia de la descarga.

⁹ CAPELA, C., HACKENBERG, C., RUSSO, C., Medronho, R., Theoretical analysis of oily water hydrocyclones, Citado por: DOROTEO, Edgar. Diseño y operación de un hidrociclón para mejorar la técnica de lavado de suelos. Tesis Magíster en Ingeniería. Instituto de ingeniería. México: Universidad Nacional Autónoma de México 2010, p. 18. Disponible en línea: <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/3947/1/doroteoreyes.pdf>>

Figura 2. Trayectoria teórica de la pulpa dentro del hidrociclón.



Fuente: <https://www.911metallurgist.com/blog/how-to-size-a-cyclone-hydrocyclone>

El hidrociclón presenta tres componentes por medio de los cuales ingresa y es extraída la pulpa, uno de ellos es donde se lleva a cabo la alimentación del equipo. En esta parte es controlada la entrada del material y tiene como objetivo orientar su ingreso hasta el punto tangencial de la sección cilíndrica.

El derrame es otro de los elementos significativos dentro de la clasificación efectuada en un ciclón debido a que su tamaño influye directamente en la presión para un volumen determinado. Cuanto mayor es el diámetro del derrame, la cantidad de sólidos en el flujo superior se presenta en mayor proporción y al disminuir su diámetro se presenta la situación contraria. La función del ápice es descargar el flujo con contenido de partículas gruesas de tal manera que se obtenga su máxima densidad, debido a esto su diámetro debe tener un tamaño adecuado el cual permita la correcta descarga del material¹⁰.

2.2.2 Patrones de flujo. El patrón de flujo de la pulpa que ingresa al hidrociclón presenta en general simetría circular a través del equipo con excepción del paso de la misma por la sección tangencial de alimentación. La velocidad en este caso puede ser dividida en tres componentes: velocidad tangencial (v_t), velocidad axial (v_a) y velocidad radial (v_r), las cuales pueden ser estudiadas de manera independiente.

¹⁰ Ibíd., p. 19.

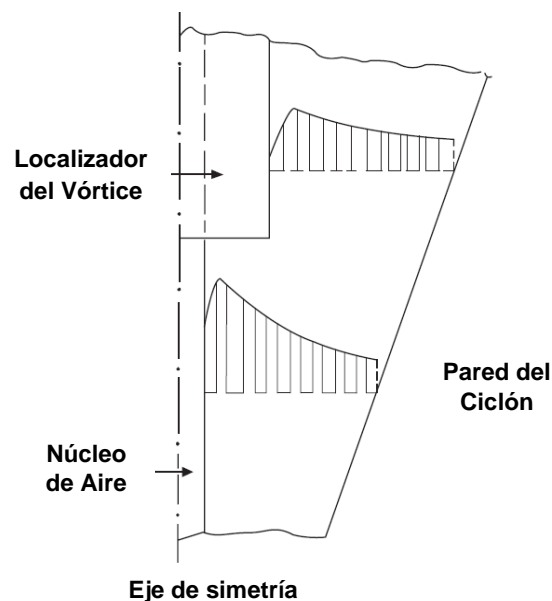
El comportamiento de la velocidad ha sido estudiado por Kelsall, el cual es citado por Svarovsky¹¹ y los resultados gráficos obtenidos por este autor son presentados en las figuras 3, 4 y 5.

2.2.2.1 Velocidad tangencial. En puntos situados por debajo del localizador del vórtice, la velocidad tangencial v_t , aumenta considerablemente con la disminución del radio hasta un radio dado, el cual es menor que el diámetro del localizador del vórtice. Esta condición se puede describir en la siguiente relación:

$$v_t r^n = \text{Constante} \quad (1)$$

Donde n está normalmente entre $0.6 \leq n \leq 0.9$. A medida que el radio aumenta, la velocidad tangencial disminuye y es proporcional a r . La relación se mantiene hasta que se alcanza el núcleo de aire, el cual se forma generalmente en un hidrociclón debido a la presión atmosférica. En un nivel superior al localizador del vórtice, la ruptura en el aumento de v_t se presenta en un radio mayor como se puede ver en la figura 3.

Figura 3. Distribución de la velocidad tangencial en un hidrociclón.



Fuente: SVAROVSKY, Ladislav. Hydrocyclones. En: Solid – Liquid Separation. 4 ed. Pardubice: Butterworth-Heinemann, 2000. p. 194.

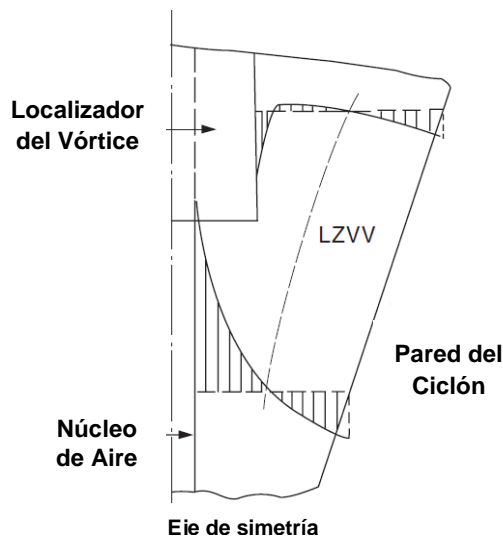
2.2.2.2 Velocidad axial. A lo largo de las paredes del hidrociclón se genera un flujo descendente el cual es muy importante para la operación del equipo debido a que remueve las partículas que son separadas por medio del flujo inferior. Debido a esto, no es esencial construir hidrociclones con el ápice orientado hacia abajo y la

¹¹ SVAROVSKY, Ladislav. Op. cit., p. 195

eficiencia se ve mínimamente influenciada por su posición respecto al campo de gravedad¹². El flujo descendente es compensado parcialmente la presencia de un flujo ascendente. Existe una región en donde no hay velocidad vertical. Allí se puede identificar la velocidad vertical cero y se aplica en la mayor parte del ciclón, a esta región se le conoce como *LZVV* por sus siglas en inglés (*Locus of Zero Vertical Velocity*)¹³.

La figura 4 muestra la distribución de la velocidad axial. En puntos ubicados por encima del localizador del vórtice, se generan las mayores velocidades descendentes cerca de la pared del ciclón y en radios entre la pared del ciclón y el núcleo de aire, la velocidad axial se vuelve hacia arriba, debido al flujo de la pared que se extiende hacia el interior y en las cercanías de la pared del ciclón. Esta velocidad tiene una dirección hacia el localizador del vórtice.

Figura 4. Distribución de la velocidad axial en un hidrociclón.



Fuente: SVAROVSKY, Ladislav. *Hydrocyclones*. En: *Solid – Liquid Separation*. 4 ed. Pardubice: Butterworth-Heinemann, 2000. p. 194.

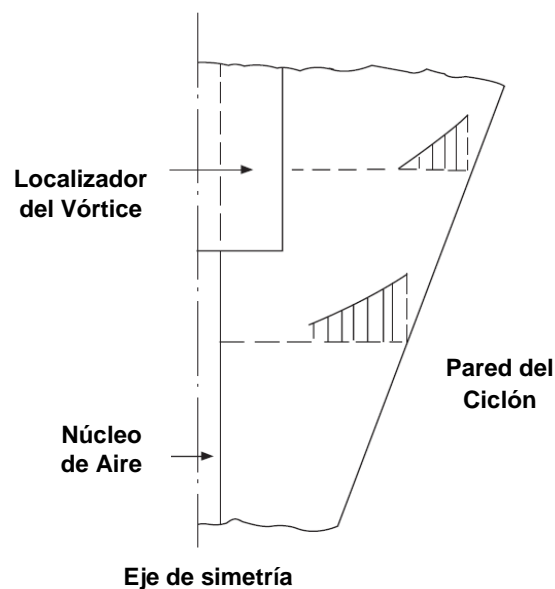
2.2.2.3 Velocidad radial. Los componentes de la velocidad radial son más pequeños en comparación con los componentes de las velocidades anteriormente mencionadas. La velocidad radial se presenta hacia el interior y su magnitud disminuye con la disminución del radio (figura 5). No se conoce la posición radial de la velocidad radial cero. En este caso, se pueden presentar flujos recirculatorios en

¹² *Ibíd.*, p. 194.

¹³ MARTHINUSSEN, Svein. *The Effect of Fluid Viscosity on Hydrocyclone Performance*. Master Thesis Process Technology. Bergen: University of Bergen. Department of Physics and Technology, 2011.p. 14. Disponible en línea: <<http://bora.uib.no/bitstream/handle/1956/5138/85304051.pdf?sequence=1>>

puntos superiores al localizador del vórtice, entre tanto, en la parte superior plana del ciclón se generan fuertes velocidades radiales hacia el interior, las cuales van dirigidas hacia la raíz del localizador del vórtice ocasionando de esta forma un flujo conocido como cortocircuito¹⁴. Esta condición se genera cuando partículas del mismo tamaño y similares propiedades físicas, son enviadas al desbordamiento o al ápice, debido a que pueden poseer respuestas hidrodinámicas diferentes. Como los finos no llegan a la descarga por efecto de una clasificación, sino que simplemente pasan por el interior del equipo, se interpreta este hecho considerando la existencia de un cortocircuito entre la alimentación y la descarga¹⁵.

Figura 5. Distribución de la velocidad radial en un hidrociclón.



Fuente: SVAROVSKY, Ladislav. Hydrocyclones. En: Solid – Liquid Separation. 4 ed. Pardubice: Butterworth-Heinemann, 2000. p. 195.

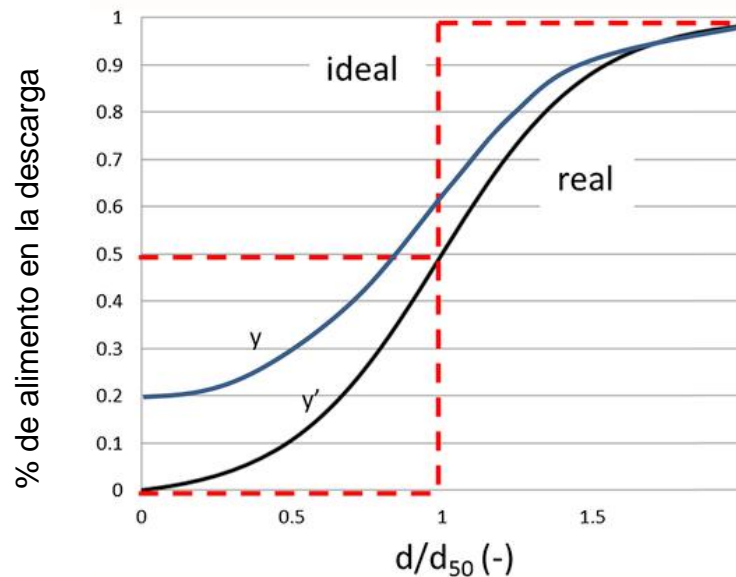
Los patrones de flujo en un hidrociclón son altamente complejos y puede ser incorrecto suponer que perfiles precisamente similares se producen en ciclones con una geometría considerablemente diferente a los empleados por Kelsall o para líquidos de alta viscosidad.

¹⁴ SVAROVSKY, Ladislav Op. cit., p. 195.

¹⁵ CHICA, Lina. Estudio del cortocircuito de finos en hidrociclones operados con suspensiones polimineraleas en la industria cementera. Tesis Magíster en Ingeniería. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, 2009. 64 p. Disponible en línea: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/2461/1/39192498.2009.pdf>>

2.2.3 Eficiencia y recuperación de un hidrociclón. El método más utilizado para evaluar la eficiencia de un ciclón es mediante la construcción de la curva de Tromp o curva de rendimiento. Esta curva relaciona el porcentaje de cada tamaño presente en la sección de alimentación que es enviado al ápice con el tamaño de la partícula (figura 6). El punto de corte d_{50} se define como el valor del tamaño de partículas que tiene la misma posibilidad de ir a la fracción gruesa o a la fracción fina o como aquel punto sobre la curva para el cual el 50% de las partículas de ese tamaño en la alimentación se presentan en el derrame.

Figura 6. Curva de rendimiento corregida y sin corregir.



Fuente: <https://reader.paperc.com/books/Progress-in-Filtration-and-Separation/306720/B978012384746100001X>

Diferentes modelos matemáticos desarrollados para los hidrociclones incluyen el término d_{50} corregido, tomado de la curva de clasificación corregida. La corrección de esta curva puede ser necesaria para sólidos de todos los tamaños que son enviados al underflow lo cual genera un cortocircuito en proporción directa a la fracción del agua en la alimentación y que llega a la sección de descarga.

La curva puede corregirse utilizando la siguiente ecuación:

$$C = \frac{S - R_w/u}{1 - R_w/u} \quad (2)$$

Donde C es la fracción de masa corregida de un tamaño particular que se reporta a la descarga, S es la fracción de masa real de un tamaño particular que se reporta a la descarga y R_w/u es la fracción de líquido de la alimentación que se recupera en la corriente del producto grueso. Las curvas de clasificación se modelan empleando

funciones de forma sigmoideal. La forma exponencial de las curvas ha conducido a varios modelos de adaptación y uno de los más comunes fue desarrollado por *Plitt*, el cual es citado por *Wills*. Matemáticamente este modelo indica que:

$$C = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{d}{d_{50}}\right)^m\right] \quad (3)$$

Donde m representa la forma de la curva y es una medida de la agudeza de la separación. Por su parte, la eficiencia de separación o imperfección se encuentra dada por:

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}} \quad (4)$$

La recuperación en un hidrociclón también está ligada a la eficiencia y esta se define como la relación entre el peso de un componente del concentrado en una operación de separación al del mismo componente que se encuentra en la alimentación. Este concepto se expresa mediante la siguiente ecuación.

$$R = \frac{Cc}{Ff} \quad (5)$$

Donde F , C y T son respectivamente los pesos de la alimentación, el concentrado y el estéril y f , c y t las riquezas de cada uno. Teniendo en cuenta que se obtienen estos dos productos (concentrado y estéril) se puede realizar un balance mediante la siguiente relación:

$$F = C + T \quad (6)$$

$$F = \frac{Cc}{Tt} \quad (7)$$

Al multiplicar la ecuación (6) por t y restando la ecuación resultante de la (7) se tiene:

$$F(f - t) = C(c - t) \quad (8)$$

La eficiencia se define en general como la relación entre el peso del material clasificado y el clasificable en la alimentación. Siendo F y C , los pesos tanto de la alimentación como del producto requerido, y f y c las proporciones respectivas. El peso del tamaño indeseado es $(C - Cc)$. Este peso, corresponde a material sin clasificar. Entre tanto la relación de los pesos del material del producto requerido al no deseable es de $f / (1 - f)$ y siendo x el peso del material requerido (ecuación 9):

$$\begin{aligned} \frac{x}{c(1-c)} &= \frac{f}{(1-f)} \\ x &= \frac{cf(1-c)}{1-f} \end{aligned} \quad (9)$$

De esta manera el peso del material clasificado en el producto es:

$$C - C(1 - c) - \frac{cf(1-c)}{1-f} = \frac{c(c-f)}{1-f} \quad (10)$$

Teniendo en cuenta que el peso del material clasificable en la alimentación es Ff se tiene la ecuación:

$$E = \frac{C}{F} = \frac{(c-f)}{f(1-f)} \quad (11)$$

Sustituyendo en la ecuación el resultado es:

$$E = \frac{(c-f)(f-t)}{f(1-f)(c-t)} \quad (12)$$

Donde t es la proporción del material deseado contenido en el producto que se quiere desechar.

2.2.4 Agudeza de separación. La agudeza de separación está determinada por la pendiente de la sección central de la curva de rendimiento. Cuanto más cerca se encuentre la pendiente a la vertical, mayor será la eficiencia de clasificación. La pendiente de la curva también puede expresarse tomando los puntos en los que el 75% y el 25% de las partículas de alimentación se reportan al underflow. Estos son los tamaños d_{75} y d_{25} , respectivamente. El índice de agudeza de separación (SI) está dado por:

$$SI = \frac{d_{25}}{d_{75}} \quad (13)$$

El índice de agudeza vale 1 para una clasificación ideal y cero cuando no existe clasificación, un valor normal es 0.65.¹⁶

2.2.5 Caída de presión. Debido a que las variables de operación tienen un efecto importante dentro del funcionamiento del hidrociclón es necesario evitar al máximo fluctuaciones como por ejemplo la caída de presión. Esta expresión hace referencia a la disminución de la presión de un fluido en una tubería y se encuentra dada por la suma de las presiones estáticas y dinámicas. Por lo general, la caída de presión se determina a partir de un manómetro de alimentación situado en la línea de entrada a una cierta distancia aguas arriba del ciclón¹⁷. En un hidrociclón estas pérdidas de presión pueden ser debidas a:

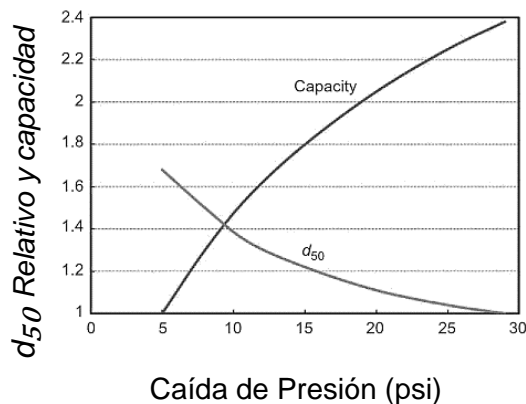
¹⁶ WILLS, B.A. Op. cit., p. 205.

¹⁷ Ibíd., p. 212.

- Pérdidas en la entrada
- Pérdidas en el cuerpo del ciclón
- Pérdidas en el localizador del vórtice

Para un ciclón de entrada tangencial, las pérdidas en la entrada son frecuentemente insignificantes en comparación con las que se presentan en otras partes del equipo. Sin embargo, la caída de presión disminuye con el coeficiente de fricción en las paredes, concentración de sólidos o volumen del equipo en general. En el cuerpo del ciclón las pérdidas son mayores, pero su principal contribución es la disminución de la intensidad del remolino, por lo tanto las pérdidas en las paredes no dominan la pérdida de presión total. Las pérdidas en el localizador del vórtice son más grandes para los ciclones de entrada tangencial debido a la disipación de energía mecánica. Es posible que se presenten sin embargo, algunas excepciones a esto, como por ejemplo cuando la pulpa tiene una alta carga sólida. En ese caso, el arrastre por fricción en las paredes puede llegar a ser una contribución significativa a la caída de presión a expensas de las pérdidas en el núcleo del vórtice y el localizador del vórtice¹⁸. Debido a que el aumento de la velocidad de alimentación o la caída de presión aumenta la fuerza centrífuga, las partículas finas son conducidas al underflow y el d_{50} disminuye. El cambio tiene que ser grande para que tenga un efecto significativo. La figura 7 muestra el efecto de la presión sobre la capacidad y el punto de corte de los ciclones¹⁹.

Figura 7. Efecto de la presión en la capacidad y el punto de corte del hidrociclón.



Fuente: WILLS, B.A. Classification. En: Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 8 ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2016. p. 212.

¹⁸ MARTHINUSSEN, Svein. Op. cit., p. 16.

¹⁹ WILLS, B.A. Op. cit., p. 212.

2.3 DISEÑO DE UN HIDROCICLÓN

Como lo explica Bouso²⁰, se han implementado mejoras tratando de ampliar la capacidad y eficiencia de los ciclones así como ajustes en el diseño hidráulico de los diferentes componentes, principalmente en la entrada tangencial, el localizador del vórtice y el ápice de descarga, buscando disminuir la fricción que se genera por el paso de la pulpa en todo el equipo.

Para la fase de diseño, los programas de simulación del comportamiento de los fluidos son de gran utilidad debido a que permiten visualizar las trayectorias de las corrientes que se generan en el equipo en distintas condiciones de servicio. Esto ha permitido mejorar el diseño de algunos componentes del hidrociclón, reduciendo o eliminando las zonas críticas en donde se generaban turbulencias.

2.3.1 Variables geométricas y parámetros básicos para un ciclón estándar.

Arterburn²¹ señala, que un ciclón estándar es el que posee sus propias relaciones geométricas definidas entre el diámetro del ciclón, área de entrada, localizador del vórtice, diámetro del ápice y longitud suficiente para proporcionar un tiempo adecuado de clasificación de partículas.

Debido a que las variables de diseño interactúan con variables operativas, es recomendable emplear las siguientes condiciones operativas base para una determinada aplicación:

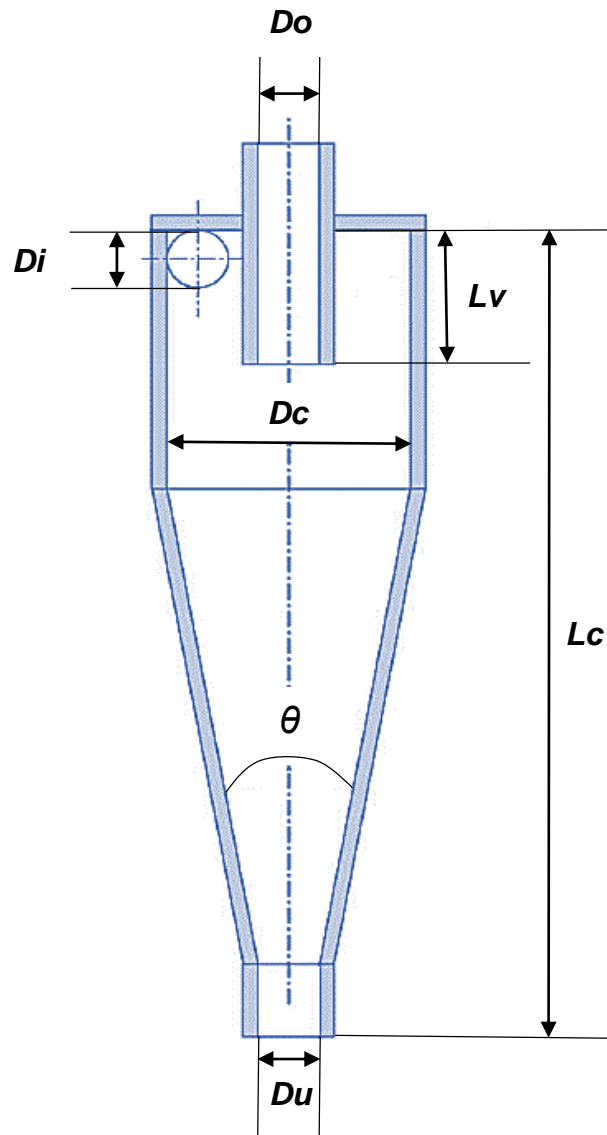
- Líquido de alimentación: Agua a 20 ° C.
- Sólidos de alimentación: Partículas esféricas con una gravedad específica de 2,65.
- Concentración de la alimentación: Menos de 1% de sólidos por volumen.
- Caída de presión - 69 kPa (10 psi).

Las proporciones geométricas de un hidrociclón están definidas según las necesidades del proceso que se desee efectuar y la influencia de todas las variables es relativa a las condiciones base listadas. La nomenclatura varía según el autor, pero en general es presentada como se observa en la figura 8:

²⁰ BOUSO, Juan Luis. Nuevas tendencias de clasificación en el procesamiento de minerales [En línea]. <<http://eralchile.com/pdf/17.pdf>> [Fecha de consulta: 07 de octubre de 2016]. p. 5.

²¹ ARTERBURN, Richard A. Op. cit., p. 2.

Figura 8. Variables Geométricas de un Hidrociclón.



Fuente: https://www.researchgate.net/figure/229125964_fig1_Fig-1-Hydrocyclone-geometry

En dónde: **D_c** : Diámetro del Hidrociclón, **D_i** : Diámetro de entrada, **D_o** : Diámetro del localizador del vórtice, **D_u** : Diámetro del ápice, **L_c** : Longitud del Hidrociclón, **L_v** : Longitud del localizador del vórtice y **θ** : Ángulo de la sección cónica.

2.3.1.1 Diámetro del hidrociclón. Es la variable geométrica más importante en cuanto al diseño y operación del hidrociclón ya que rige la división por tamaños. Debido a que las fuerzas centrífugas generadas en el interior del equipo varían inversamente con el diámetro, es posible obtener una separación más fina con un diámetro pequeño. Experimentalmente se ha podido observar que:

$$d_{50}c \propto Dc^n \quad (14)$$

Donde Dc es el diámetro del ciclón y n tiene un valor entre 0,46 y 0,683, (los valores más bajos de n se asocian a suspensiones muy diluidas).

Los ciclones de mayor diámetro tienen una mayor capacidad de manejo de sólidos. Así, la capacidad, a una presión de entrada dada varía con D^2 . De manera más específica, si Q es la capacidad de un ciclón de diámetro D (in), entonces Q es igual a:

$$Q = 0,7071D^2\sqrt{\Delta P} \quad (15)$$

Donde ΔP es la presión de entrada en psi. Para mayor precisión, se debe corregir Q cuando se está bombeando la suspensión. Sin embargo, al descuidar esta corrección, se incorpora automáticamente un factor de seguridad²², el cual está determinado por el cociente entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real a que se verá sometido.

2.3.1.2 Diámetro y forma de la entrada. Determina la velocidad de entrada de la pulpa, la cual rige en gran parte las características de la velocidad tangencial en función del radio. Las boquillas de entrada están destinadas a reducir la turbulencia en las proximidades del localizador del vórtice²³.

Según indica Bradley²⁴, pueden variar en forma, tipo y posición, pero en general existen dos tipos de entrada (Figura 9), denominadas: tangencial e involuta, las cuales a su vez pueden ser cilíndricas o rectangulares.

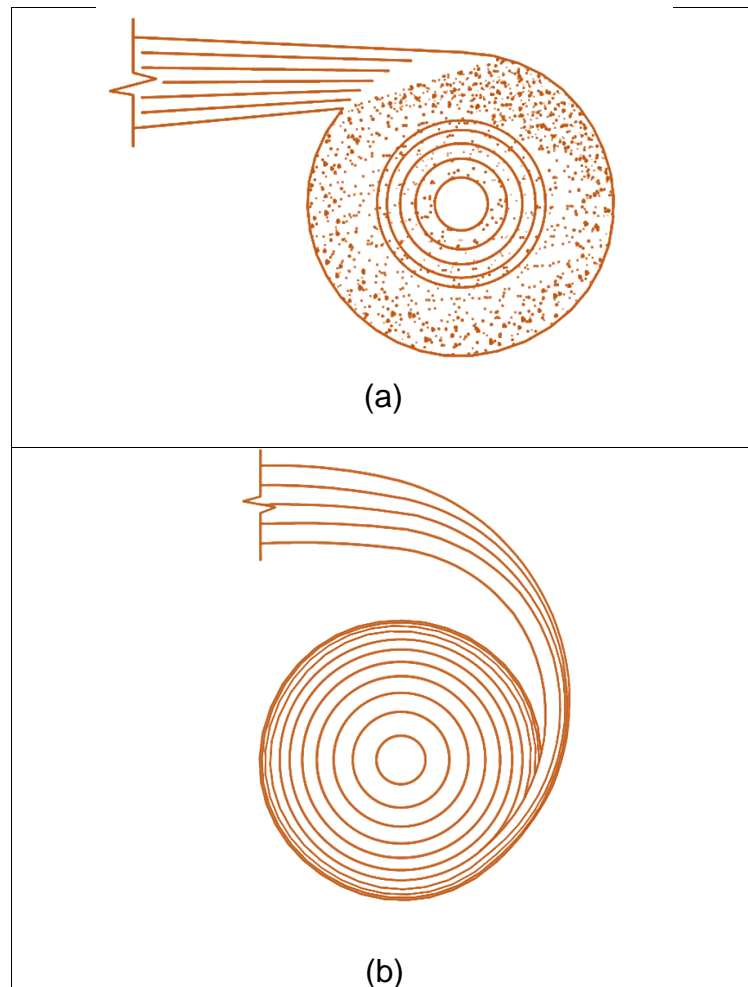
²² FUERSTENAU, Maurice C y HAN, Kenneth N. Principles of Mineral Processing. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, 2003 p. 162.

²³ YOSHIDA, Hideto. TAKASHINA, Toru. FUKUIA, Kunihiro. IWANAGA, Takeshi. Effect of inlet shape and slurry temperature on the classification performance of hydrocyclones. En: Powder Technology. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 140 (diciembre, 2003) 9 p [citado en 2 de julio de 2017] Disponible en Science Direct

²⁴ BRADLEY, D. Design Variables. En: The Hydrocyclone. London: Pergamon Press, 1965. p. 119.

Una entrada rectangular involuta presenta una mayor eficiencia frente a una entrada tangencial, pero en muchos casos es utilizada la entrada tangencial, debido a que presenta una mayor simplicidad en el proceso de fabricación del hidrociclón.

Figura 9. Tipos de entrada: (a) Tangencial, (b) Involuta.



Fuente: <https://www.911metallurgist.com/wp-content/uploads/2016/02/sizing-select-cyclones.pdf>

2.3.1.3 Diámetro y longitud del localizador del vórtice. Es una variable que está relacionada con la distribución de partículas tanto en el derrame como en el ápice. Para los ciclones que tienen diámetro fijo, el diámetro del localizador del vórtice afecta el d_{50} . Cuanto mayor es dicho diámetro las partículas que salen por el derrame son más gruesas.

En condiciones base el diámetro del localizador del vórtice es $Do = 0,35Dc$ y este debe extenderse por debajo de la entrada de la alimentación para evitar que los sólidos pasen directamente al desbordamiento, la parte inferior del localizador del vórtice termina generalmente debajo de la unión de la cámara de alimentación cilíndrica y la sección cilíndrica.

Si se toma a L_v como la longitud del localizador del vórtice entonces $L_v = 0,55Dc$. Una longitud menor hará que el desbordamiento sea mayor; así como extender su longitud hasta la sección cónica generará un desbordamiento más grueso²⁵.

2.3.1.4 Longitud de la sección cilíndrica y ángulo del cono. Estas dos variables están relacionadas debido a que afectan el tiempo de residencia de la pulpa en el equipo. Teniendo en cuenta que la longitud de la sección cilíndrica sea igual al diámetro del ciclón, para las condiciones base, una separación más fina se obtendrá a partir del aumento de la longitud de dicha sección, así como la disminución del ángulo del cono generará un incremento en la longitud de la sección cónica y debido a esto el tiempo de residencia puede aumentar, disminuyendo tanto el d_{50} , como la agudeza de separación.

De igual manera, aumentar el ángulo del cono, en un ciclón de diámetro fijo disminuirá la longitud de la sección, de manera que el tiempo de retención puede ser menor. El d_{50} se incrementará y la agudeza de separación puede aumentar.

Para los ciclones en los que el diámetro es inferior a 10 pulgadas, los ángulos cónicos son generalmente de 12° ; para los ciclones más grandes, el ángulo del cono es alrededor $18^\circ - 20^\circ$ ²⁶.

2.3.1.5 Diámetro del ápice y relación Du/Do . El ápice se origina en donde finaliza la sección cónica y su diámetro es el que determina la densidad del flujo inferior. Debe tener el tamaño suficiente como para descargar los sólidos gruesos sin generar obstrucciones en el equipo y permitir la entrada de aire a lo largo del eje del ciclón para establecer un núcleo de aire y así evitar el *roping*.

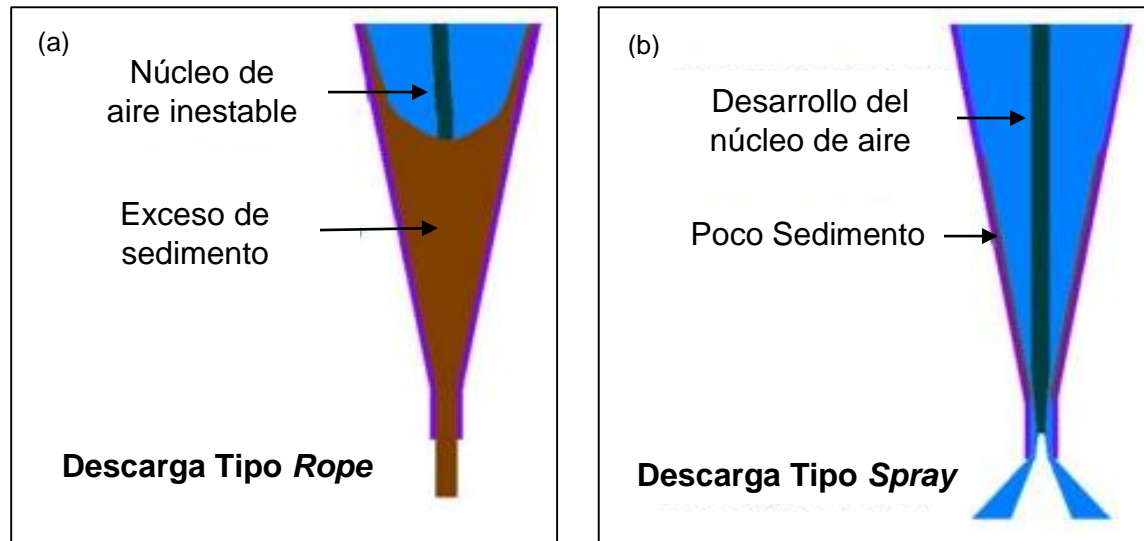
Si el núcleo de aire que se genera en el eje del ciclón es inestable es posible que se presente la descarga tipo *rope*, en la cual el material de la descarga pasa a través del ápice en dirección paralela al eje vertical del cono (figura 10 (a)).

²⁵ FUERSTENAU, Maurice C y HAN, Kenneth N. Op. cit., p. 163.

²⁶ Neesse, T. Dueck, J. Air core formation in the hydrocyclone. Minerals Engineering 20, 2007. 349–354p, Citado por: CHICA, Lina. Estudio del cortocircuito de finos en hidrociclones operados con suspensiones polimineraleas en la industria cementera. Tesis Magíster en Ingeniería. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, 2009. 64 p. Disponible en línea: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/2461/1/39192498.2009.pdf>>

Un orificio de un ápice demasiado grande genera el patrón de descarga en *spray*, en donde el flujo cruza el ápice con un ángulo de 30 - 45° con respecto al mismo eje del cono (figura 10 (b)), bajo esta circunstancia en general el líquido estará excesivamente diluido y el agua adicional llevará sin clasificar los sólidos finos que en condiciones normales serían descargados a través del flujo superior²⁷.

Figura 10. Tipos de descarga (a) Rope y (b) Spray.



Fuente: <http://biblio.uptc.edu.co:2054/science/article/pii/S0892687511002810>

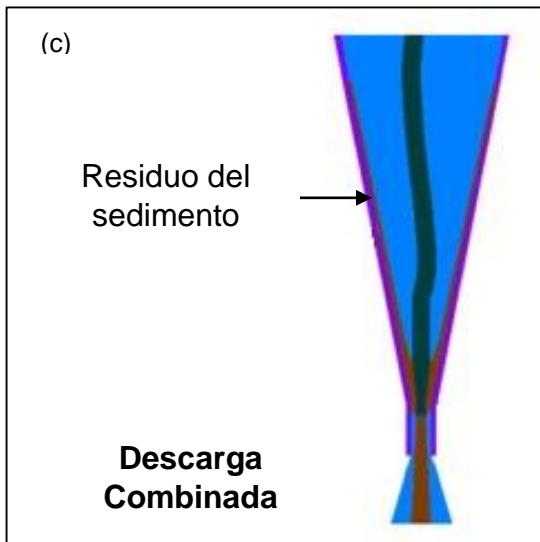
Diferentes autores han estudiado el efecto que la relación entre el diámetro del flujo superior e inferior tiene sobre el tipo de descarga que presenta el hidrociclón.

El investigador Neesse²⁸, ha podido determinar que la descarga tipo *rope* a una concentración alta de sólidos de alimentación da como resultado normalmente mayores contenidos de sólidos y menos finos en el producto grueso. Por otro lado, la descarga tipo *spray* a una concentración de sólidos de alimentación baja presenta una mayor recuperación de sólidos y menores tamaños de corte. En consecuencia, se pueden esperar condiciones óptimas generales en un tipo de descarga combinada como se observa en la figura 11.

²⁷ WILLS, B.A. Op. cit., p. 213.

²⁸ NEESSE, Th. SCHNEIDER, M. DUECK, J. GOLYK, V. BUNTENBACH, S. TIEFEL, H. Hydrocyclone operation at the transition point rope/spray discharge. En: Minerals Engineering. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 17 (enero, 2004) p. 733 – 737 [citado en 27 de julio de 2017] Disponible en Science Direct

Figura 11. Descarga Combinada.



Fuente: <http://biblio.uptc.edu.co:2054/science/article/pii/S0892687511002810>

Entre tanto otros investigadores como Bustamante y Concha han establecido valores dentro de los cuales es posible que se presente determinado tipo de descarga según la relación Du/Do . La comparación entre los valores expuestos por estos autores es presentada por Gupta²⁹ (tabla 1).

Tabla 1. Transición entre la descarga tipo Rope y en Spray.

Autor	Du/Do	Tipo de descarga
Bustamante	< 0,34	<i>Rope</i>
	0,34 - 0,5	<i>Rope o spray</i>
	> 0,5	<i>Spray</i>
Concha	< 0,45	<i>Rope</i>
	0,45 - 0,56	<i>Rope o spray</i>
	> 0,56	<i>Spray</i>

Fuente: GUPTA, A. YAN, D. S. Classification. En: Introduction to Mineral Processing Design and Operation. Western: Elsevier B. V, 2006. p. 385.

Según estos resultados así como los de diferentes investigaciones realizadas, se define que debido a que el diámetro del núcleo de aire depende de la tensión

²⁹ GUPTA, A. YAN, D. S. Classification. En: Introduction to Mineral Processing Design and Operation. Western: Elsevier B. V, 2006. p. 385.

superficial, la viscosidad y los diámetros de desbordamiento y flujo inferior, la relación Du/Do es una variable determinante³⁰.

2.3.2 Variables de operación. Son las que influyen en el rendimiento del hidrociclón, dentro de las variables de operación se pueden encontrar las siguientes:

2.3.2.1 Presión de entrada. Está ligada a la velocidad de entrada la cual rige la velocidad tangencial en cualquier punto del hidrociclón. Dicha velocidad se encuentra dada por la ecuación (16), donde Q es la tasa de flujo volumétrico de la pulpa. Un incremento de Q aumentará la presión de entrada en relación con el desbordamiento, aumentando de esta forma el efecto de la fuerza centrífuga. El d_{50} también es afectado por la variación de Q aunque en menor medida y está relacionado con la presión de entrada según la ecuación (17):

$$V_{in} = Q / A \quad (16)$$

$$d_{50} \propto 1.9(\Delta P)^{-0.28} \quad (17)$$

Donde ΔP está en psi. Incrementos en la presión de entrada también generan un aumento en la fracción de finos recuperados en la descarga³¹.

Chu Liang³² por su parte, indica que la velocidad radial de la partícula aumenta a medida que lo hace la presión de entrada, debido a que la capacidad es proporcional a la presión de operación.

2.3.2.2 Gravedad específica. Debido a que el hidrociclón no consigue ciertamente una clasificación de tamaño sino más bien de masas, la gravedad específica de la partícula es de gran importancia en este proceso.

En determinadas aplicaciones, esta propiedad presenta un valor mayor que la ganga (según el mineral), lo cual que permite una mejor liberación de partículas a un tamaño de separación más grueso.

La ley de Stokes puede aplicarse para determinar diámetros de partícula que producirían la misma velocidad de sedimentación terminal para un líquido y una

³⁰ *Ibíd.*, p. 386.

³¹ FUERSTENAU, Maurice C y HAN, Kenneth N. *Op. cit.*, p. 165.

³² CHU, Liang-Yin. CHEN, Wen-Mei. LEE, Xiao-Zhong. Effects of geometric and operating parameters and feed characters on the motion of solid particles in hydrocyclones. En: *Separation and Purification Technology*. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 26 (julio, 2001) p. 244. [citado en 09 de junio de 2017]. Disponible en Science Direct

partícula de gravedad específica conocidas en comparación con una partícula que tenga un valor de 2,65 en agua³³.

En relación con las condiciones de base, el tamaño d_{50} se encuentra relacionado con esta propiedad de modo que:

$$d_{50} \propto \sqrt{(\rho_{base} - \rho_l)/(\rho - \rho_l)} = \sqrt{(1.65)/(\rho - 1)} \quad (18)$$

Donde ρ y ρ_l son la gravedad específica del sólido y del líquido respectivamente, en este caso el valor del agua es tomado como uno. También es posible sustituir el de la suspensión en la expresión anterior por el del líquido, debido a que las fuerzas que actúan sobre las partículas dependen del medio interno³⁴.

En general, en un sólido puede ser determinada a partir de la variación de volumen generada por el sólido de peso conocido y calculada con la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{w}{v} \quad (19)$$

Donde w es el peso del mineral y v la variación de volumen.

2.3.2.3 Densidad de Pulpa. Se encuentra asociada con la eficiencia de separación del hidrociclón. Según expone Ghodrat³⁵, dicha eficiencia disminuye con la disminución de la densidad de partículas; un aumento en la densidad a su vez generará un incremento en la fuerza centrífuga lo que hará que las partículas de menor tamaño sean enviadas a las paredes del ciclón produciendo una disminución del tamaño de corte.

La variación de la densidad también está ligada al tipo de descarga que presente el equipo, ya que si no se controla adecuadamente puede generar inconvenientes como la descarga tipo *roping*. Sin embargo Mular and Jull, citados por Gupta³⁶,

³³ ARTERBURN, Richard A. Op. cit., p. 4.

³⁴ FUERSTENAU, Maurice C y HAN, Kenneth N. Op. cit., p. 165.

³⁵ GHODRAT, M. QI, Z. KUANG, S.B. JI, L. YU, A.B. Computational investigation of the effect of particle density on the multiphase flows and performance of hydrocyclone. En: Minerals Engineering. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 90 (enero, 2010) p. 55 – 69 [citado en 04 de julio de 2017] Disponible en Science Direct

³⁶ A.L. Mular and N.A. Jull, in Mineral Processing Plant Design, A.L. Mular and R.B. Bhappu (eds.), SME/AIME, Chapter 17, 1980, Citado por: GUPTA, A. YAN, D. S. Classification. En: Introduction to Mineral Processing Design and Operation. Western: Elsevier B. V, 2006. p. 385.

sugieren que se puede lograr una mayor densidad en el underflow, sin el riesgo de *roping*, si el ciclón es operado con una alta densidad de desbordamiento.

La densidad de pulpa puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$W = 1000 + wk \quad (20)$$

Donde w representa el peso de los sólidos en un litro de pulpa y K es una constante de sólidos la cual se determina a partir de la gravedad específica del mineral:

$$K = \frac{\rho - 1}{\rho} \quad (21)$$

2.3.2.4 Tamaño de partícula y concentración de los sólidos. Una suspensión que presente un contenido alto de partículas gruesas y bajo de finas puede incrementar el tamaño de corte. La distribución granulométrica también se encuentra relacionada con la recuperación de agua en el desbordamiento³⁷.

El nivel de porcentaje de sólidos es extremadamente importante para determinar la separación apropiada, ya que cuanto mayor es la concentración, esta es más gruesa³⁸. Un cambio en el porcentaje de sólidos en la alimentación de ciclón provocará una variación tanto la gravedad específica como la viscosidad del medio interno, lo que a su vez afecta el tamaño de corte, la agudeza de la separación, el tipo de descarga y la capacidad del equipo³⁹. Es posible determinar la cantidad de sólidos en un litro de pulpa y el porcentaje de sólidos a través de las ecuaciones:

$$w = \frac{W - 1000}{K} \quad (22)$$

Donde:

P : Porcentaje de sólidos, w : Peso de los sólidos (g); W : Densidad de pulpa (g/l);

K : Constante de sólidos

³⁷ CHICA, Lina. Op. cit., p. 19.

³⁸ ARTERBURN, Richard A. Op. cit., p. 3.

³⁹ CHICA, Lina. Op. cit., p. 20.

$$P = \frac{W-1000}{WK} * 100 \quad (23)$$

$$P = \frac{w}{W} * 100 \quad (24)$$

A partir del porcentaje de sólidos también se puede calcular la relación de dilución (ecuación 25), y el volumen de agua contenido en un litro de pulpa (ecuación 26) lo cual sirve para determinar el porcentaje de líquido que sale tanto por el overflow como por el underflow en el proceso de clasificación.

$$D = \frac{100 - P}{P} \quad (25)$$

$$L = w(1 - P) \quad (26)$$

Si el ciclón es alimentado a la velocidad de $F \text{ t h}^{-1}$ de sólidos secos y las velocidades de flujo de la masa del underflow y el overflow son U y V respectivamente, entonces como la cantidad total de agua que entra al ciclón debe igualar la cantidad que lo deja en la unidad de tiempo se puede decir que⁴⁰:

$$F = U + V \quad (27)$$

2.3.2.5 Viscosidad. Es una variable de gran importancia en la operación de clasificación en el hidrociclón debido a que está relacionada con la velocidad de sedimentación de las partículas y en general con la velocidad de la pulpa en el interior del equipo. A medida que aumenta la viscosidad, disminuye la eficiencia así como la caída de presión. Un hidrociclón presenta una mayor agudeza de separación al ser operado a valores bajos de viscosidad⁴¹.

⁴⁰ WILLS, B.A. Op. cit., p. 205.

⁴¹ MARTHINUSSEN, Svein. Op. cit., p. 79.

2.4 APLICACIONES DEL HIDROCICLÓN

Debido a las ventajas que posee el hidrociclón frente a diferentes equipos de clasificación presenta variadas aplicaciones dentro del procesamiento de minerales y además su uso se ha extendido a campos como la bioquímica, la farmacéutica y la petroquímica. Cada una de las aplicaciones tiene objetivos específicos y debido a esta condición es necesario implementar cambios en el diseño y en la operación del ciclón para de esta manera conseguir el mayor provecho del equipo y obtener resultados óptimos. Para comprender su importancia se estudiarán más a fondo, algunos de los usos dentro de los cuales se encuentran:

2.4.1 Clarificación. El interés primario de este proceso es obtener un desbordamiento claro, lo que en consecuencia indica maximizar la recuperación de sólidos en el flujo inferior (underflow). Para efectuar la clarificación, la pulpa debe contener pequeñas cantidades de sólidos y se debe presentar una alta caída de presión.

Los ciclones empleados en clarificación deben tener un diámetro pequeño y un ángulo estrecho, se deben operar en paralelo y en general con un diseño que presente alta eficiencia, es decir, los orificios de entrada y salida de la pulpa deben ser de diámetros pequeños⁴².

En las plantas de lavado de carbón estos equipos son muy utilizados debido a que el agua de procesos o de soluciones madre deben reciclarse. En este caso los hidrociclones son instalados frecuentemente en paralelo para mantener el nivel de turbiedad del agua de reciclado dentro de los valores admitidos.

En la industria química y petrolera se emplean comúnmente para la eliminación de agua después de un proceso de cristalización en donde los cristales más finos son arrastrados por el flujo superior (overflow), utilizándose posteriormente en el cristizador donde actúan como núcleos para la formación de un nuevo cristal⁴³. Además de las aplicaciones mencionadas, el proceso de clarificación presenta las siguientes aplicaciones específicas:

- Recuperación de catalizadores en las industrias petrolera y química.
- Eliminación de las partículas de cal de los chorros de agua y del agua de refrigeración de los rodillos en las plantas de laminación de acero.

⁴² SVAROVSKY, Ladislav. Op. cit., p. 238.

⁴³ TRAWINSKI, Helmut. Aplicaciones y funcionamiento práctico de los hidrociclones. Adaptación de ERAL S.A. 1973. [En línea]. <<https://es.scribd.com/document/48229144/Aplicaciones-y-funcionamiento-practico-de-los-hidrociclones>> [Fecha de consulta: en 12 de septiembre de 2016].

- Separación de los productos de corrosión en los sistemas de circulación de la industria nuclear.
- Eliminación de sólidos (acero o virutas metálicas) de refrigerantes para trabajo con metales, fluidos de corte o agua de lavado circulante en la industria de la ingeniería.
- Limpieza de agua de lavado en lavadoras de piezas de motor.
- Eliminación del sedimento del agua de pozo.
- Limpieza del agua de depuradores de gas para reciclaje.
- Limpieza del agua en sistemas de lavado de autos.
- Limpieza previa de lodos de aguas residuales primarias (1-2% de sólidos).
- Eliminación de arena, incrustaciones y otras partículas orgánicas o inorgánicas para proteger intercambiadores de calor.
- Recuperación de sales de soluciones salinas.
- Eliminación de partículas finas de suspensiones acuosas o no acuosas.

2.4.2 Espesado. El objetivo del espesado es obtener una alta concentración de sólidos en el flujo inferior. Se diferencia del proceso de clarificación en cuanto al diseño del ciclón, así como en la concentración de sólidos en la alimentación siendo en este caso frecuentemente más alta.

Si se van a utilizar hidrociclones para producir gruesos, se debe considerar que es inevitable la pérdida de sólidos en el desbordamiento, por lo tanto un hidrociclón no puede emplearse para tareas de clarificación y espesamiento al mismo tiempo. Las concentraciones de sólidos en el flujo inferior pueden alcanzar el 50% con algunos materiales, este rendimiento en el espesado permite que los hidrociclones sean comparados favorablemente con los espesadores de gravedad y en algunos casos reemplazados debido a su bajo costo y alta capacidad.

Para el espesamiento de mezclas, el hidrociclón presenta algunas aplicaciones dentro de las cuales se encuentran:

- Espesamiento del producto de desecho de los sistemas de desulfuración de gases de combustión donde se utilizan ciclones para reemplazar los espesadores de gravedad más costosos.
- Desague de limos en operaciones de dragado.
- Densificación del medio recuperado y limpio, en plantas de recuperación de medio en separación de medio denso.

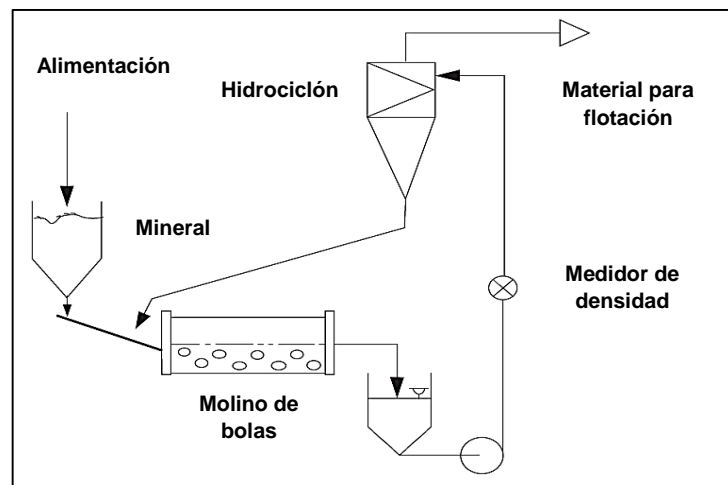
Aparte de las aplicaciones existentes en el procesamiento de minerales, este equipo también presenta aplicaciones potenciales en la industria química, como por ejemplo en la recuperación y concentración de cristales de cloruro de amonio y bicarbonato de sodio.

2.4.3 Clasificación de los sólidos según tamaño. Los hidrociclones en este proceso son empleados para efectuar la separación sólido-sólido por tamaño de partícula. A medida que la eficiencia del ciclón aumenta con el tamaño de partícula, este puede ser utilizado para separar la alimentación en una fracción compuesta por material fino y otra por material grueso.

Industrialmente, este tipo de separación de sólidos es utilizada cuando se necesita que las partículas, según su tamaño sigan diferentes rutas en una planta, como por ejemplo en la molienda en húmedo en circuito cerrado en donde las partículas de mayor tamaño son devueltas al molino para una molienda posterior. En la figura 12 se puede observar su uso en un circuito cerrado de molienda, aunque existen otras disposiciones de molienda posibles como lo son: en circuito abierto o abierto/cerrado (doble función o de dos etapas).

En este tipo de aplicaciones los hidrociclones se usan para eliminar las partículas finas en operaciones de lavado o gruesas en operaciones de deslamado o refinación⁴⁴.

Figura 12. Clasificador hidrociclón utilizado en un circuito cerrado de molienda.



Fuente: SVAROVSKY, Ladislav. Hydrocyclones. En: Solid – Liquid Separation. 4 ed. Pardubice: Butterworth-Heinemann, 2000. p. 240.

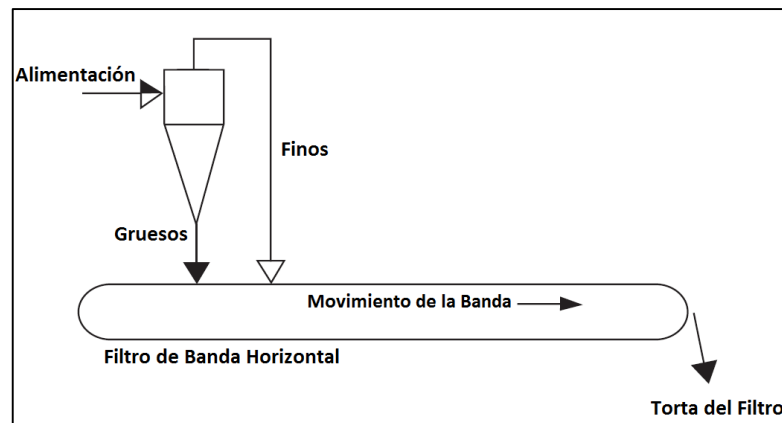
Los ciclones son comúnmente utilizados para mejorar el rendimiento de otros equipos ya sea de filtración o de separación. Un buen ejemplo se desarrolla en operaciones donde el contenido del flujo inferior del ciclón alimenta un filtro de banda horizontal y seguidamente es descargado en la banda el contenido del

⁴⁴ SVAROVSKY. Ladislav. Op. cit., p. 240.

derrame (figura 13). Es necesario tener en cuenta que el punto de corte del equipo debe ser ajustado correctamente.

Teniendo el material en la superficie del filtro, la separación sólido-líquido se lleva a cabo gracias a la aspiración que imprime una bomba de vacío bajo la superficie donde reposa el producto. Este procedimiento proporciona una mayor claridad del filtrado y extiende la utilidad de los filtros sin afectar el contenido de humedad de la torta⁴⁵.

Figura 13. Utilización de un hidrociclón en un sistema de filtro de banda horizontal.



Fuente: SVAROVSKY, Ladislav. Hydrocyclones. En: Solid – Liquid Separation. 4 ed. Pardubice: Butterworth-Heinemann, 2000. p. 241.

Algunos ejemplos adicionales acerca del uso de hidrociclones son:

- Deslamado de minerales previo al proceso de flotación, lo cual disminuye la utilización de reactivos.
- Deslamado previo a la lixiviación, generando mayores coeficientes de extracción.
- Deslamado de lodos de perforaciones
- Separación de arcilla de baritina contenida en lodos de perforación para el control de gravedad específica.
- Destilación de aguas subterráneas antes del uso en bombas.
- Clasificación de mezclas de cemento antes de la entrada hornos rotatorios realizada con altas concentraciones sólidos (para reducir la carga térmica de los hornos) las fuerzas paralelas en el ciclón superan la tensión producida por la mezcla que normalmente se comporta como un plástico de *Bingham*.
- Deslamado de roca fosfórica.
- Clasificación del mineral de hierro; la fracción gruesa es utilizada para la fabricación de sinter y la fracción fina para la fabricación de pellets.

⁴⁵ Filtro de banda de vacío [En línea]. <http://www.gruptefsa.com/filtros_de_vacio/08-Filtros%20vaci%CC%81o.pdf> [Fecha de consulta: 01 de agosto de 2017]

- Clasificación de arena por tamaños⁴⁶.

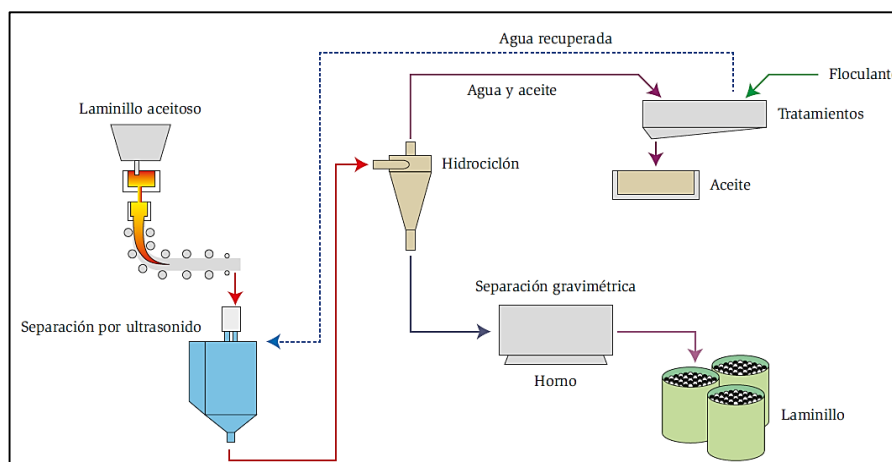
En general se pueden observar las diversas aplicaciones que presenta el hidrociclón, lo cual pone en manifiesto la importancia que este equipo tiene industrialmente.

Adicionalmente se puede mencionar su utilización en operaciones que han sido objeto de estudio:

En las plantas de fabricación de acero es importante efectuar el reciclado del laminillo generado en la colada continua, el horno de precalentamiento y el laminador debido a que puede ser utilizado en procesos posteriores como la fabricación de cemento.

La figura 14 muestra el proceso de reciclado del laminillo en una planta piloto el cual es separado del acero por medio de tensiones mecánicas y mediante la inyección de agua a presión. Las partículas se suman a la corriente de agua de enfriamiento y se depositan en hidrociclones donde tanto el aceite y el agua que se encontraban mezclados junto con el laminillo son recuperados y reutilizados⁴⁷.

Figura 14. Planta piloto de separación de laminillo aceitoso.



Fuente:https://www.alacero.org/es/system/files/asset_tecnologia/reciclado_de_laminillo_de_laminacion_y_colada_continua.pdf

⁴⁶ SVAROVSKY. Ladislav. Op. cit., p. 241.

⁴⁷ Reciclado de laminillo de laminación y colada continua [En línea]. <https://www.alacero.org/es/system/files/asset_tecnologia/reciclado_de_laminillo_de_laminacion_y_colada_continua.pdf> [Fecha de consulta: 01 de agosto de 2017]

3. METODOLOGÍA

3.1 ESTADO DEL ARTE

Como se ha visto anteriormente, el hidrociclón es un equipo de clasificación de partículas muy importante a nivel industrial, esto hace que los investigadores y los diseñadores busquen con el apoyo de la tecnología mejorar sus condiciones de servicio. Cada año se presentan en diferentes partes del mundo numerosos estudios relacionados con el hidrociclón y su funcionamiento. En cuanto al estudio de este tema se puede señalar lo siguiente:

Castilho y Medronho⁴⁸, en el año 2000, publicaron el artículo: *A simple procedure for desing and performance prediction of Bradley and Rietema hydrocyclones*. La base de este estudio fue realizar una comparación entre dos familias de hidrociclones (*Bradley* y *Rietema*) teniendo en cuenta sus características geométricas. Encontraron que el hidrociclón tipo *Bradley* presenta una alta eficiencia, mientras que el hidrociclón *Rietema* tiene una mayor capacidad. La publicación mencionada presenta gran relevancia en este ámbito y ha sido punto de referencia para el desarrollo de estudios posteriores.

Como ya se ha indicado con anterioridad el uso de hidrociclones transparentes es habitual para la realización de investigaciones realizadas a nivel de laboratorio debido a que es necesario visualizar el comportamiento de la pulpa. Este es el caso del estudio realizado por Liang-Yin Chu⁴⁹ titulado: *Effects of geometric and operating parameters and feed characters on the motion of solid particles in hydrocyclones*, el cual traduce: Efectos de la geometría y parámetros de operación y caracteres de la alimentación sobre el movimiento de partículas sólidas en hidrociclones. Para el desarrollo de este trabajo se construyó un hidrociclón en un tipo de acrílico llamado *Perspex*, el equipo de 80 mm de diámetro se utilizó para medir y analizar el movimiento de las partículas mediante el uso de un instrumento denominado PDA (Particle Dynamics Analyzer), que opera con tecnología láser y fue empleado para estudiar la velocidad radial de las partículas determinando que esta aumenta a medida que lo hace la presión de entrada o con el incremento del diámetro de la tubería del flujo inferior y disminuye cuando la densidad de partícula o el tamaño de partícula es mayor.

⁴⁸ CASTILHO, L. R. MEDRONHO, R. A. A Simple Procedure for Design and Performance Prediction of Bradley and Rietema Hydrocyclones. En: Minerals Engineering. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 13, no. 2 (febrero, 2000); 9 p [citado en 06 de julio de 2017]. Disponible en Science Direct

⁴⁹ CHU, Liang-Yin. CHEN, Wen-Mei. LEE, Xiao-Zhong. Op. cit., p. 237 – 246.

En el ámbito latinoamericano se puede mencionar el trabajo realizado por Bouso⁵⁰, el cual tiene como título: *Nuevas tendencias de clasificación en el procesamiento de minerales*. Este se enfocó básicamente en hacer un recuento de varios factores que intervienen en el diseño de un hidrociclón como lo son su geometría y el material empleado para construirlo, también se menciona el uso de polímeros para la construcción de hidrociclones como una buena opción para la industria destacándose el uso del poliuretano y las carcasas plásticas reforzadas con fibra de vidrio. Se estudiaron allí las tendencias que se aplicaban en el momento y que son importantes para el desarrollo de estos equipos hoy en día.

Las proporciones geométricas del equipo, desempeñan un papel fundamental en la eficiencia de la separación. Buscando determinar los cambios que se generan a partir de la variación de una de estas proporciones, Fernández Lucía⁵¹, efectuó un estudio para determinar cómo la variación de la longitud del localizador del vórtice presenta efectos significativos sobre la recuperación de masa y distribución de tamaño de partícula en corrientes de desbordamiento y en el flujo inferior (underflow). El estudio se denominó: *Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation*, fue presentado en el año 2007 y allí se determinó que la longitud óptima de esta variable se encuentra dentro del 10% de la longitud total del ciclón.

Debido a las múltiples aplicaciones que presenta el hidrociclón, es motivo de estudio en diversas áreas. En el año 2008 se efectuó un estudio llamado: *Desempenho de um hidrociclone de geometria "Rietema" como pré-filtro para sistemas de irrigação* por el autor Carlos da Cruz⁵². Para el desarrollo de este trabajo se construyó un hidrociclón tipo *Rietema* el cual se utilizó como pre-filtro para sistemas de riego el cual hace posible que un área determinada sea cultivada a partir de la aplicación del agua necesaria para las plantas. Del trabajo se puede tomar como referencia los resultados obtenidos a partir de las relaciones geométricas presentadas.

⁵⁰ Bouso. Op. cit., p. 7 – 11.

⁵¹ FERNÁNDEZ, Lucía. GUTÉRREZ, Antonio. MAHAMUD, Manuel. BUENO, Julio. Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation. *En: Chemical Engineering and Processing*. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 47 (marzo, 2007) p. 192 – 199 [citado en 26 de julio de 2017] Disponible en Science Direct

⁵² CRUZ, O. C. Desempenho de um hidrociclone de geometria "rietema" como pré-filtro para sistemas de irrigação. Tesis Doctor en Agronomía. Sao Paulo: Universidad Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Facultad de Ciencias Agrarias, 2008, 80 p. Disponible en línea: <<http://www.fcav.unesp.br/download/pgtrabs/pv/d/2975.pdf>>

Dentro de la gran cantidad de investigaciones relacionadas con este tema, se menciona la realizada por Hararah M⁵³, (*Flow conditions in the air core of the hydrocyclone*). Allí se construyó un hidrociclón transparente en policarbonato de 50 milímetros de diámetro con el fin de observar y analizar el núcleo de aire formado en el interior del aparato mediante unas condiciones de operación establecidas. Para la alimentación se utilizaron esferas de vidrio de 50 μm . Los resultados determinaron que el núcleo de aire está relacionado comportamiento operacional del ciclón, también se estableció la distribución radial de la velocidad tangencial del aire y se demostró que la velocidad axial media del aire depende de la caída de presión y de la geometría del hidrociclón.

La tesis de maestría denominada: *Diseño y operación de un hidrociclón para mejorar la técnica de lavado de suelos* por Doroteo Reyes⁵⁴ en 2010, fue realizada en la Universidad Autónoma de México y en ella se expone el procedimiento desarrollado para la construcción de un hidrociclón tipo *Rietema* el cual presenta buenos resultados para la aplicación a la que es sometido además de los métodos y materiales que son relevantes para el diseño y puesta en marcha de un hidrociclón.

En ese mismo año, Yang Q⁵⁵, publicó el artículo: *Solid/liquid separation performance of hydrocyclones with different cone combinations*. En el que se diseñaron hidrociclones con dos combinaciones de cono para evaluar el rendimiento del equipo al modificar su diseño. Las pruebas se efectuaron con sólidos procedentes del sistema de desulfuración de gases de una central eléctrica, determinándose que el cambio de ángulo del cono tiene un efecto significativo sobre el valor de las velocidades (tangencial, axial y radial), separación de flujo, eficiencia de separación y consumo de energía.

En Colombia el estudio de estos aparatos también se presenta de manera habitual. Como caso singular se puede citar a Chica⁵⁶, quien en 2013 presentó su trabajo

⁵³ HARARAH, M.A. ENDRES, E. DUECK, J. MINKOV, L. NEESSE, T. Flow conditions in the air core of the hydrocyclone. En: Minerals Engineering. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 23 (enero, 2010) p. 295 – 300 [citado en 06 de julio de 2017] Disponible en Science Direct

⁵⁴ DOROTEO Op. cit., p. 26.

⁵⁵ YANG, Q. WANG, Hua-lin. LIU, Yi. LI, Zhi-ming. Solid/liquid separation performance of hydrocyclones with different cone combinations. En: Separation and Purification Technology. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 171 (junio, 2010) p. 271 – 279 [citado en 2 de julio de 2017] Disponible en Science Direct

⁵⁶ CHICA, Lina. BUSTAMANTE, Oswaldo. BARRIENTOS, Arturo. Disipación de Energía Mecánica en la Descarga de un Hidrociclón: Nueva Estrategia de Modelado. En: DYNA [base de datos en línea]. Vol. 80, no. 181 (agosto, 2013); 14 p [citado en 10 de julio de 2017]. Disponible en Redalyc

denominado: *Disipación de energía mecánica en la descarga de un hidrociclón: nueva estrategia de modelado*. Allí se estudia el comportamiento de un fluido newtoniano en la sección de descarga de un hidrociclón transparente de 100 milímetros de diámetro mediante un balance de energía. Para su desarrollo se tienen en cuenta ciertos parámetros tales como la relación entre el diámetro del underflow y el overflow (D_u/D_o), que determina el tipo de descarga que se presenta, la cual está ligada con la eficiencia de separación.

La investigación realizada en 2016 por Long Ni⁵⁷ (*Experimental study of the effect of underflow pipe diameter on separation performance of a novel de-foulant hydrocyclone with continuous underflow and reflux function*), tuvo como objetivo poner en funcionamiento un hidrociclón en conjunto con intercambiador de calor con el fin de solucionar los problemas de atascamiento que se presentan en este tipo de equipos dentro del tratamiento de aguas residuales. Para lograr una mayor eficiencia de separación se estudió el efecto del diámetro del tubo de flujo inferior del ciclón y se utilizó una mezcla de agua y arena, además de aguas residuales domésticas con un tamaño de partícula inferior a 4 milímetros.

Actualmente se fabrican hidrociclones en diferentes clases de materiales buscando minimizar su costo de fabricación y maximizar los resultados de operación. Debido a que este tipo de equipos presentan un diseño simple y un funcionamiento efectivo se pueden seguir desarrollando aplicaciones que impliquen la separación de sólidos o líquidos.

3.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HIDROCIKLÓN

Dentro de las etapas para el diseño del hidrociclón se encuentran las siguientes:

3.2.1 Dimensionamiento del hidrociclón. Se determinó el diámetro del ciclón debido a que es la variable geométrica que rige la relación con las demás variables las cuales dan como resultado el dimensionamiento final. La elección de las dimensiones se realizó después de revisar en la literatura las relaciones geométricas expuestas Rietema⁵⁸ y Arterburn⁵⁹ según datos experimentales

⁵⁷ NI, Long. TIAN, Jinyi, ZHAO, Jianing. Experimental study of the effect of underflow pipe diameter on separation performance of a novel de-foulant hydrocyclone with continuous underflow and reflux function. *En: Separation and Purification Technology*. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 171 (julio, 2016) p. 270 – 279 [citado en 29 de marzo de 2017] Disponible en Science Direct

⁵⁸ SVAROVSKY, Ladislav. Op. cit., p. 214.

⁵⁹ ARTERBURN, Richard A. Op. cit., p. 1.

obtenidos. Se determinó un diámetro de 145 milímetros; a partir de este dato las relaciones geométricas se aprecian en la tabla 2:

Tabla 2. Relaciones geométricas del hidrociclón.

Diámetro Hidrociclón (Dc)	145 mm
D_i/D_c	0,175
D_o/D_c	0,35
D_u/D_c	0,2
L_v	0,55
L_c	5
θ	15°

Fuente: Autor

Para la operación del ciclón se utilizó electrobomba Pedrollo y sus características son presentadas en la tabla 3:

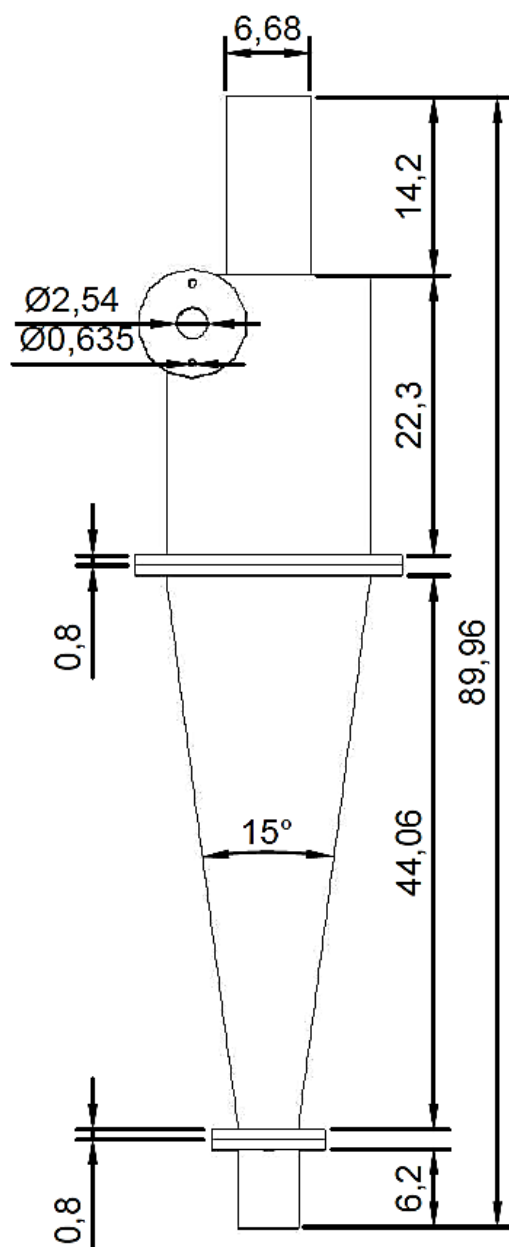
Tabla 3. Características de la electrobomba.

Potencia (Hp)	Diámetro de entrada (pulg)	Diámetro de descarga (pulg)	Altura máxima (m)	Caudal máximo (l/min)	Tipo de impulsor
1	2	2	13,7	500	Abierto

Fuente: Autor

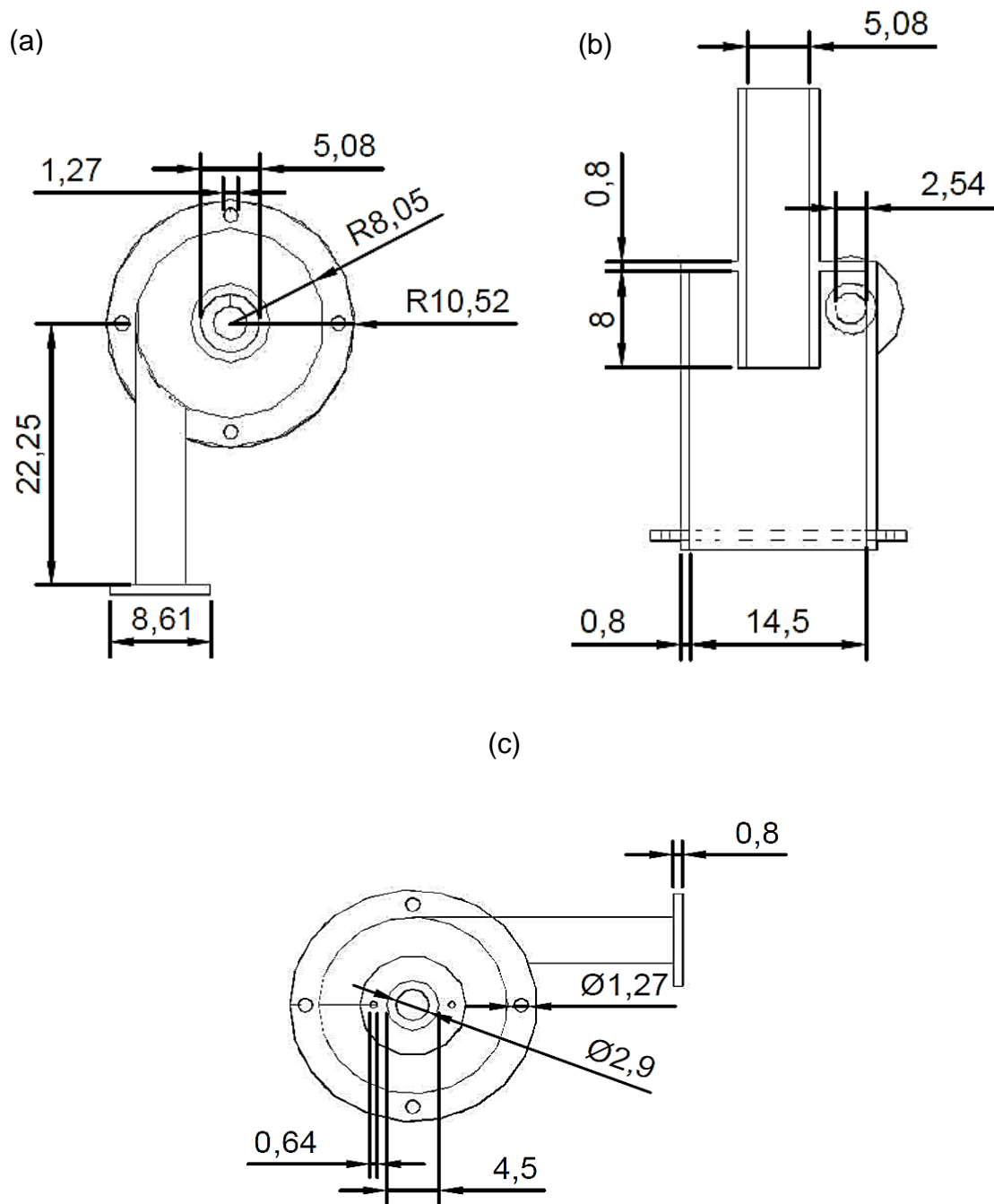
Después de tener definidas las dimensiones, se realizaron los planos en 2D y 3D con la ayuda del software AutoCAD 2016. En la figura 15 se pueden observar las diferentes dimensiones del ciclón y en la figura 16 las vistas del mismo.

Figura 15. Dimensiones del hidrociclón (cm).



Fuente: Autor

Figura 16. Vistas del hidrociclón. (a) Vista superior, (b) Corte lateral superior y (c) Vista inferior.



Fuente: Autor

3.2.2 Construcción del hidrociclón. Teniendo claro el dimensionamiento, se realizó la selección del polímero con el cual se efectuó la construcción del cuerpo del hidrociclón, para este caso se eligió *PMMA* teniendo en cuenta sus propiedades y la facilidad que presenta para ser moldeado.

Para iniciar el proceso se construyeron cajas en madera tipo *MDF*, en donde posteriormente se insertaron láminas de zinc, con las formas cilíndrica y cónica respectivamente, según se observa en la figura 17.

Figura 17. Construcción de moldes.



Fuente: Autor

La construcción del cuerpo del ciclón fue realizada en general mediante termoformado, para esto fue necesario preparar las láminas de acrílico (*PMMA*) de manera adecuada efectuando un corte y posterior pulido (figura 18). Luego fueron llevadas a un horno durante 8 minutos a 350°C e inmediatamente después se depositaron en los respectivos moldes en donde fueron enfriadas durante 30 minutos (figura 19).

Figura 18. Corte y pulido de láminas de acrílico.



Fuente: Autor

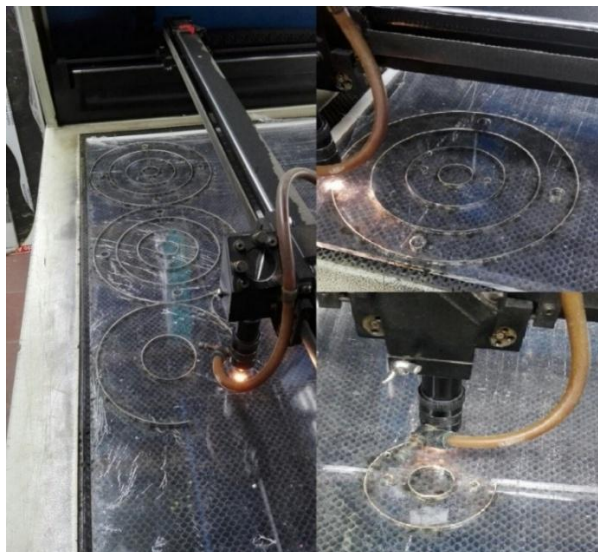
Figura 19. Termoformado de láminas.



Fuente: Autor

Teniendo las secciones listas se procedió a realizar un corte a laser de las uniones (figura 20), para eventualmente unir todas las piezas mediante la utilización de cloruro de metileno, y así dar forma al cuerpo del hidrociclón (figura 21). El resultado de todo el proceso se puede observar en la figura 22.

Figura 20. Corte a laser de uniones.



Fuente: Autor

Figura 21. Unión de piezas.



Fuente: Autor

Figura 22. Cuerpo del hidrociclón.



Fuente: Autor

3.2.3 Diseño y construcción del montaje experimental. Para la realización del montaje experimental se utilizaron los siguientes materiales:

- Tubo cuadrado de 1 pulgada calibre 18
- Equipo de soldadura
- Soldadura 6013
- Pulidora
- Anticorrosivo
- Tubería PVC y accesorios de 1 y 2 pulgadas
- Soldadura para tubos y accesorios en PVC
- Manómetro
- Recipiente plástico

El montaje experimental se realizó según el diagrama mostrado en la figura 23 y para el mismo fue necesaria la construcción de un armazón en tubo cuadrado de una pulgada.

Figura 23. Diagrama de montaje experimental.



Fuente: Autor

1: Electrobomba, 2: Recipiente Plástico, 3: Válvula, 4: Hidrociclón, 5: Válvula, 6: Manómetro.

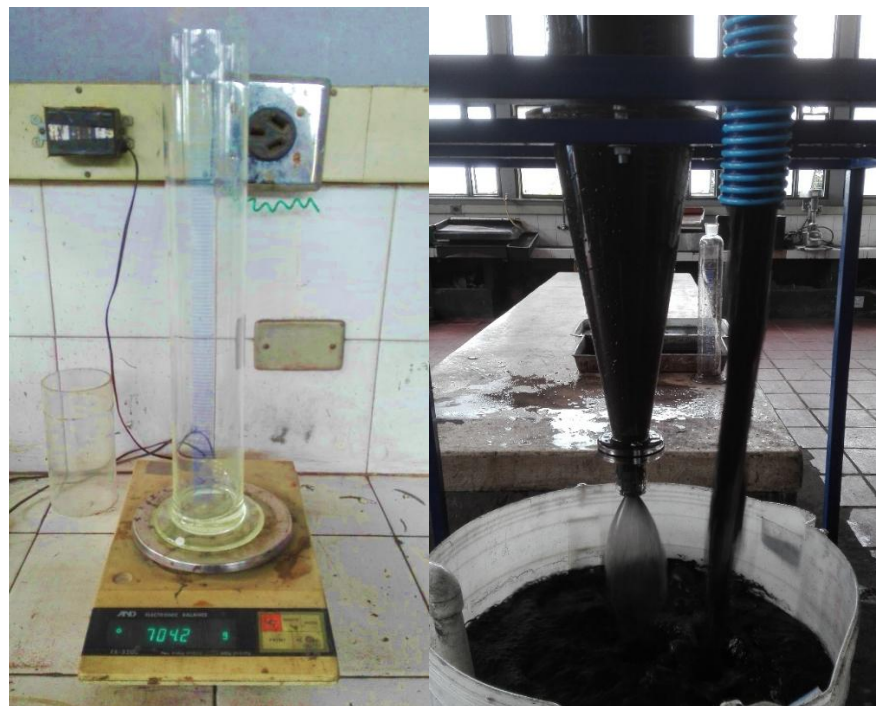
3.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El hidrociclón se puso en marcha a partir de pruebas preliminares donde se establecieron las condiciones de operación para la toma de muestras y la determinación de la eficiencia del equipo. Se utilizó carbón proveniente de la mina pantano ubicada en el municipio de Samacá. Dicho carbón fue triturado para conseguir un tamaño de partículas menor a 5 milímetros. Esto con el fin de obtener un adecuado funcionamiento de la electrobomba empleada, así como una clasificación efectiva la cual se encuentra en función del diámetro del hidrociclón.

Seguidamente se determinó la cantidad de agua y sólidos que constituyen la pulpa empleada en el proceso. Esta pulpa estuvo compuesta por 80 litros de agua y 2000 gramos de carbón. Se puso en marcha el hidrociclón con la pulpa mencionada anteriormente y una presión de entrada de 5 psi. A partir de allí se tomaron 10 muestras de la pulpa en la alimentación, el underflow y el overflow en una probeta graduada de 1 litro la cual registro un peso de 704,2 gramos (figura 24).

Se hizo necesario disminuir el diámetro del ápice debido a que en la operación del ciclón se presentó una descarga tipo spray. Para este propósito se elaboró una boquilla en caucho, la cual tiene un diámetro de 19 milímetros.

Figura 24. Toma de densidades.



Fuente: Autor

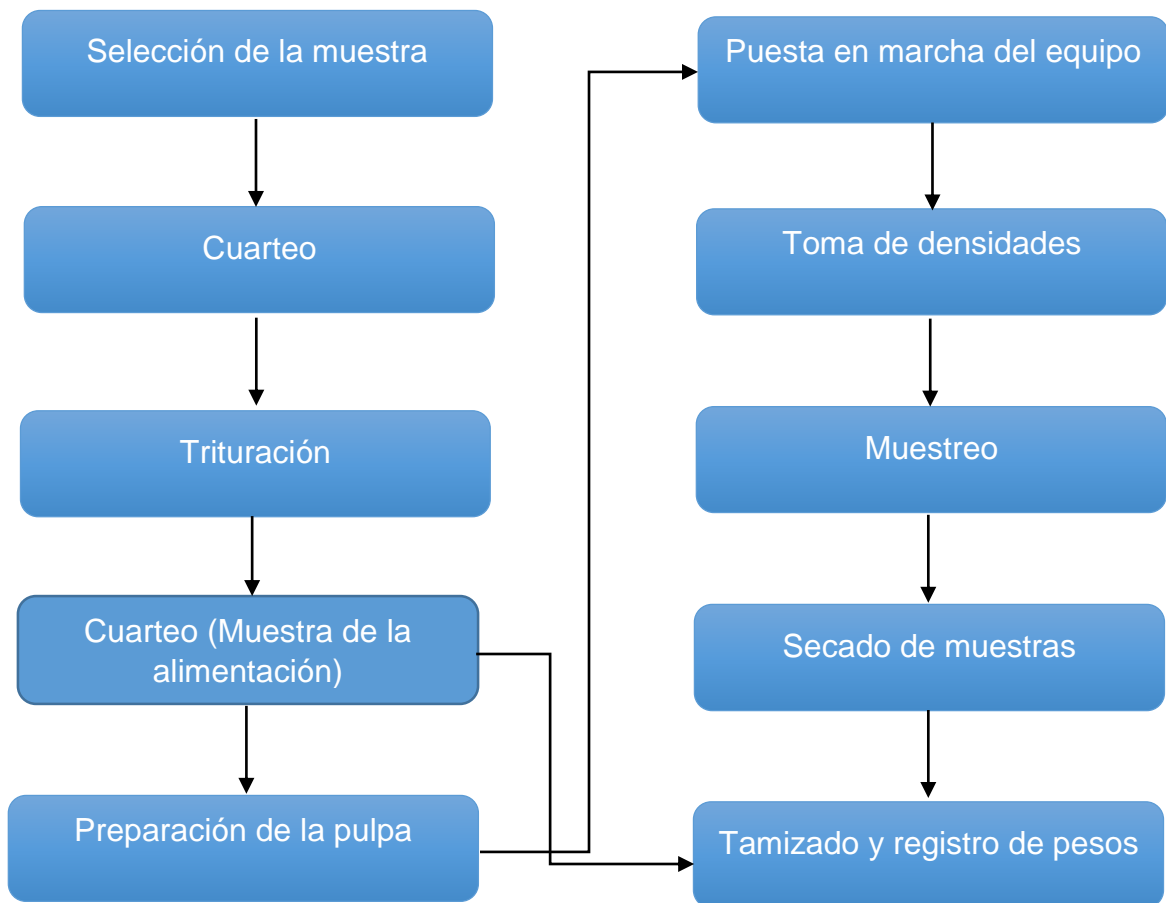
Después de realizar la toma de las densidades se realizó un muestreo para obtener posteriormente carbón seco y determinar la distribución granulométrica de las muestras obtenidas tanto en el overflow como el en underflow mediante tamizado (figura 25). El diagrama de flujo del proceso realizado es presentado en la figura 26.

Figura 25. Tamizado de muestras.



Fuente: Autor

Figura 26. Diagrama de flujo del proceso.



Fuente: Autor

4 RESULTADOS

Para determinar la eficiencia del hidrociclón se tomaron 10 muestras de la pulpa en una probeta graduada de un litro de capacidad, tanto de la alimentación como de las salidas del hidrociclón (underflow y overflow). Los valores obtenidos se observan en la tabla 4:

Tabla 4. Densidades experimentales.

Número de Muestra	Alimentación (F)	Overflow (V)	Underflow (U)
1	1729,7	1709,9	1784,4
2	1732,4	1710,6	1785,7
3	1734,5	1712,4	1786,4
4	1725,3	1712,3	1781,8
5	1725,5	1708,4	1784,7
6	1727,2	1708,5	1784,6
7	1733,2	1711,3	1787,2
8	1728,6	1712,6	1781,8
9	1725,8	1709,8	1785,5
10	1730,6	1711,4	1787,2
Promedio	1729,28	1710,72	1784,93
Densidad (g/L)	1025,08	1006,52	1080,73

Fuente: Autor

Los valores de densidad que se registraron a partir de la toma de muestras fueron obtenidos bajo las siguientes condiciones de operación:

Presión de entrada: 5 psi

Porcentaje de sólidos: 11,65%

Los resultados obtenidos a partir del tamizado de las muestras se presentan en la tabla 5, teniendo en cuenta que la distribución granulométrica de la alimentación se obtuvo de manera alterna al proceso.

Tabla 5. Distribución granulométrica de las muestras.

Tamiz (Malla)	Peso (g)		
	Alimentación (F)	Underflow (U)	Overflow (V)
40	27,4	34,3	1,2
60	20,3	16,8	1,4
80	13,2	18,4	3,8
100	9,1	16,6	10,1
120	5,1	5,8	20,5
140	6,2	3,9	21,6
200	7,4	2,5	18,3
Fondo	11,3	1,7	23,1
Total	100	100	100

Fuente: Autor

Las muestras obtenidas tanto en el underflow como en el overflow se muestran en la figura 27:

Figura 27. Muestras de carbón (a) Underflow, (b) Overflow.



Fuente: Autor

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La operación del hidrociclón con una concentración de sólidos de 11,65% generó dos productos de granulometrías diferentes como se puede observar en la figura 27. Este hecho en principio da a entender que el equipo si realizó la clasificación por tamaños y ahora para determinar su eficiencia se hace necesaria la construcción de la curva de rendimiento.

Dentro del análisis también es importante considerar el porcentaje de sólidos y la relación de dilución de cada uno de los productos así como de la alimentación y para ello se aplican las ecuaciones (23) y (25) en donde el valor de K se determina mediante la ecuación (21) y habiendo calculado la densidad del sólido previamente en donde en este caso su valor es de 1,26 g/cm³.

Dichos valores (tabla 6) son necesarios para realizar el balance de agua del hidrociclón así como para la elaboración de la curva (figura 28) a partir de la tabulación de los datos que se encuentran en la tabla 7.

Tabla 6. Porcentaje de sólidos y relación de dilución.

	P	D
f	11,65	7,58
v	3,08	31,46
u	35,57	1,81

Fuente: Autor

Con los resultados obtenidos se puede realizar un balance de agua según la ecuación (27):

$$F = U + V$$

ó

$$Ff = Uu + Vv$$

Realizando la eliminación de V se obtiene la relación entre U y F, la cual determina el porcentaje de agua que sale por la descarga.

$$7,58F = 1,81U + 31,46V$$

$$\frac{U}{F} = 0,80$$

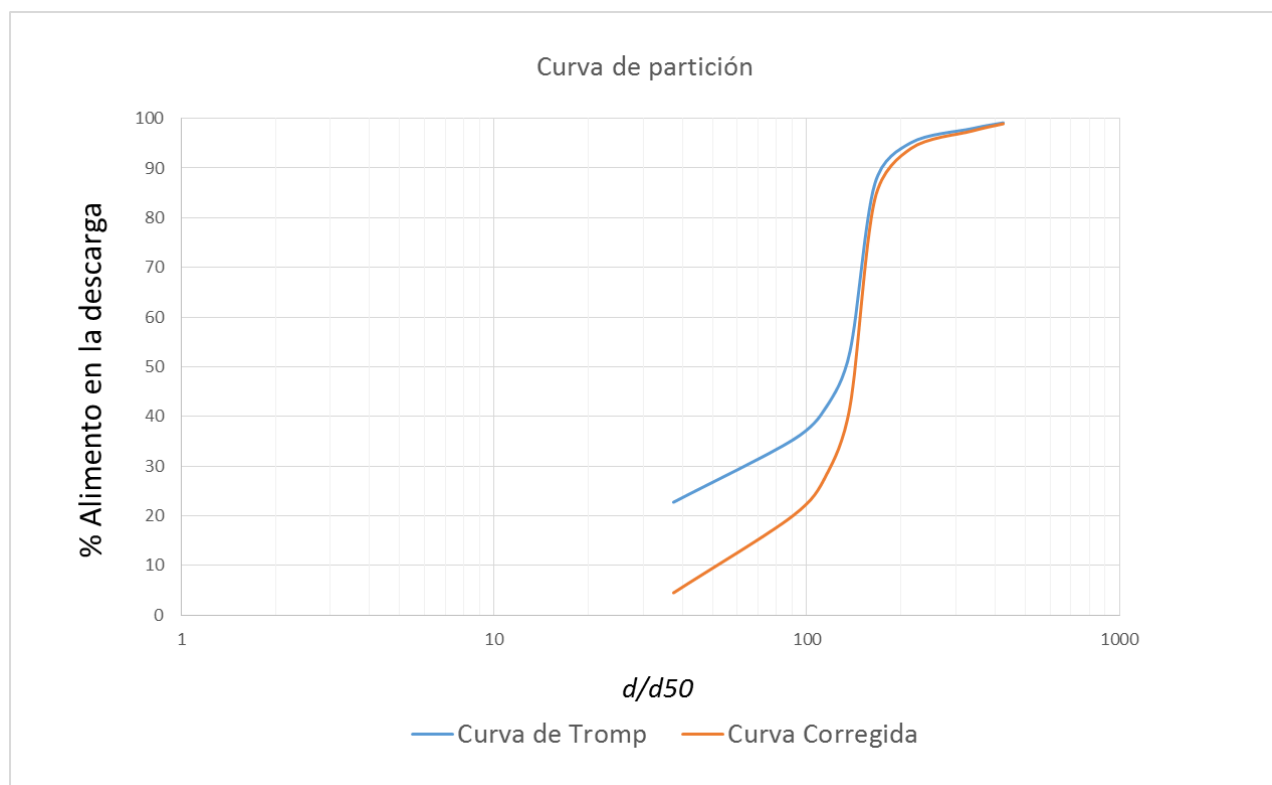
Este resultado indica que el 80% del agua que compone la pulpa sale por la descarga, por consiguiente el 20% restante sale por el derrame.

Tabla 7. Datos para la construcción de la curva de rendimiento.

Tamaño (μm)	% Peso		% En Peso de Alimentación		Alimentación Reconstituida	Tamaño Nominal (Media Aritmética)	% De Alimentación a U/F	C
	U/F	O/F	U/F	O/F				
425	34,3	1,2	27,44	0,24	27,68	425	99,13294798	98,9282038
250 - 425	16,8	1,4	13,44	0,28	13,72	337,5	97,95918367	97,4772688
180 - 250	18,4	3,8	14,72	0,76	15,48	215	95,09043928	93,931104
150 - 180	16,6	10,1	13,28	2,02	15,3	165	86,79738562	83,6797428
125 - 150	5,8	20,5	4,64	4,1	8,74	137,5	53,08924485	42,0118193
106 - 125	3,9	21,6	3,12	4,32	7,44	115,5	41,93548387	28,2242283
75 - 106	2,5	18,3	2	3,66	5,66	90,5	35,33568905	20,0659692
-75	1,7	23,1	1,36	4,62	5,98	37,5	22,74247492	4,49901498
Total	100	100	80	20	100			

Fuente: Autor

Figura 28. Curva de rendimiento.



Fuente: Autor

Según los resultados obtenidos en el proceso, se pudo determinar que el tamaño de corte del hidrociclón es de 133,5 micras.

La curva presenta un comportamiento similar al que se puede encontrar en la literatura y allí se pueden identificar los valores d_{25} , d_{50} y d_{75} , con los cuales es posible calcular la imperfección del equipo y la agudeza de separación. Dichos valores se encuentran en la tabla 8.

Existen varios métodos para el cálculo de la eficiencia de un clasificador. En este caso se tomarán en cuenta los porcentajes de sólidos en la alimentación y en los productos según la ecuación (12):

$$E = \frac{(c - f)(f - t)}{f(1 - f)(c - t)}$$

$$E = \frac{(0,356 - 0,117)(0,117 - 0,031)}{0,117(1 - 0,117)(0,356 - 0,031)}$$

$$E = 61,21\%$$

Tabla 8. Valores de d_{25} , d_{50} y d_{75} .

	Simple	Corregido
d_{25}	47	107,5
d_{50}	133,5	143
d_{75}	153	156,5

Fuente: Autor

Para el cálculo de la imperfección del equipo es necesario aplicar la ecuación (4):

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}}$$

$$I = 0,39$$

Se puede tomar como referencia que un valor de cero, indica una clasificación ideal. Considerando este parámetro se puede indicar que se presentó una clasificación aceptable.

Al aplicar la ecuación (13) se puede calcular el valor de la agudeza de separación:

$$SI = \frac{d_{25}}{d_{75}}$$

$$SI = 0,31$$

Según la literatura consultada este valor es igual a uno para una clasificación ideal y a cero cuando no existe clasificación. Aunque se advierte que un valor común es de 0,65. Teniendo en cuenta este concepto se puede afirmar que aunque existe clasificación el valor obtenido difiere de un valor común pero es necesario tener en cuenta que no todos los hidrociclones trabajan bajo las mismas condiciones de operación.

Los valores corregidos sirven en este caso para determinar cuánto se puede disminuir la imperfección y aumentar la agudeza de separación al corregir el cortocircuito generado en la operación del equipo.

5. CONCLUSIONES

- ✓ Se construyó un hidrociclón en material polimérico teniendo en cuenta los estudios y las especificaciones expuestas por diferentes autores el cual presentó una eficiencia de 61,2%, para una concentración de sólidos en la alimentación de 11,65%.
- ✓ Las pruebas experimentales evidenciaron que la presión de entrada influye en el tipo de descarga que presenta el hidrociclón y por lo tanto se encuentra también relacionada con la eficiencia de separación.
- ✓ La reducción del diámetro del ápice influyo de manera significativa en el proceso de clasificación ya que se pudo controlar el tipo de descarga que se presentó en la práctica, logrando de esta forma que menor cantidad de partículas finas salieran por el underflow.
- ✓ Mediante las pruebas experimentales se pudo determinar que el punto de corte del hidrociclón (d_{50}) es de 133,5 micras.

6. RECOMENDACIONES

- Es recomendable operar el equipo con una cantidad de agua mínima de 70 litros, de lo contrario es posible que se generen caídas de presión muy altas, las cuales ocasionan una clasificación ineficiente.
- Se recomienda la instalación de un interruptor a la electrobomba con el fin de evitar posibles daños ocasionados por la variación de corriente.
- Es recomendable trabajar con una presión mínima de 5 psi.
- Debido a que la electrobomba está diseñada para manejar altos caudales en alturas manométricas medio-bajas se recomienda instalar un regulador de velocidad para que de esta forma el hidrociclón opere con presiones mayores y no se presente la descarga tipo spray.
- Se recomienda operar el hidrociclón con sólidos de granulometrías comprendidas entre 1 y 5 milímetros con el fin de que de evitar atascamientos en el impulsor de la electrobomba.

BIBLIOGRAFÍA E INFOGRAFÍA

ALVARADO, María. VANEGAS, Marley. VALENCIA, Guillermo. Análisis estadístico de un circuito hidrociclónico para el beneficio de carbones. En: Scielo [base de datos en línea]. Vol. 14 (junio, 2016) p. 53 – 61 [citado en 2 de Noviembre de 2017] Disponible en Revista Prospectiva.

ARTERBURN, Richard A. The sizing and selection of hydrocyclones [En línea]. <<https://www.911metallurgist.com/wp-content/uploads/2016/02/sizing-select-cyclones.pdf>> [Fecha de consulta: 09 de agosto de 2017]

BOUSO, Juan Luis. Nuevas tendencias de clasificación en el procesamiento de minerales [En línea]. <<http://eralchile.com/pdf/17.pdf>> [Fecha de consulta: 07 de octubre de 2016]

BRADLEY, D. Design Variables. En: The Hydrocyclone. London: Pergamon Press, 1965. p. 107 – 130

CASTILHO, L. R. MEDRONHO, R. A. A Simple Procedure for Design and Performance Prediction of Bradley and Rietema Hydrocyclones. En: Minerals Engineering. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 13, no. 2 (febrero, 2000); 9 p [citado en 06 de julio de 2017]. Disponible en Science Direct

CHICA, Lina. BUSTAMANTE, Oswaldo. BARRIENTOS, Arturo. Disipación de Energía Mecánica en la Descarga de un Hidrociclón: Nueva Estrategia de Modelado. En: DYNA [base de datos en línea]. Vol. 80, no. 181 (agosto, 2013); 14 p [citado en 10 de julio de 2017]. Disponible en Redalyc

CHICA, Lina. Estudio del cortocircuito de finos en hidrociclones operados con suspensiones polimineraleas en la industria cementera. Tesis Magíster en Ingeniería. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, 2009. 64 p. Disponible en línea: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/2461/1/39192498.2009.pdf>>

CHU, Liang-Yin. CHEN, Wen-Mei. LEE, Xiao-Zhong. Effects of geometric and operating parameters and feed characters on the motion of solid particles in hydrocyclones. En: Separation and Purification Technology. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 26 (julio, 2001) p. 237 – 246 [citado en 09 de junio de 2017]. Disponible en Science Direct

CRUZ, O. C. Desempenho de um hidrociclone de geometria “rietema” como pré-filtro para sistemas de irrigação. Tesis Doctor en Agronomía. Sao Paulo: Universidad Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Facultad de Ciencias Agrarias, 2008, 80 p. Disponible en línea: <<http://www.fcav.unesp.br/download/pgtrabs/pv/d/2975.pdf>>

DOROTEO, Edgar. Diseño y operación de un hidrociclón para mejorar la técnica de lavado de suelos. Tesis Magíster en Ingeniería. Instituto de ingeniería. México: Universidad Nacional Autónoma de México 2010, 101 p. Disponible en línea:<<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/3947/1/doroteoreyes.pdf>>

DRZYMALA, Jan. Hydraulic and air separation. En: Mineral Processing, Foundations of theory and practice of minerallurgy. Wroclaw: Wroclaw University of Technology, 2007. p. 168 – 180

FERNÁNDEZ, Lucía. GUTIÉRREZ, Antonio. MAHAMUD, Manuel. BUENO, Julio. Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation. En: Chemical Engineering and Processing. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 47 (marzo, 2007) p. 192 – 199 [citado en 26 de julio de 2017] Disponible en Science Direct

Filtro de banda de vacío [En línea]. <http://www.gruptefsa.com/filtros_de_vacio/08-Filtros%20vaci%CC%81o.pdf> [Fecha de consulta: 01 de agosto de 2017]

FUERSTENAU, Maurice C y HAN, Kenneth N. Size Separation. En: Principles of Mineral Processing. Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, 2003. p. 156 – 168

Fundamentos teóricos de clasificación [En línea]. <<https://es.slideshare.net/Gallas190987/2-fundamentos-teoricos-de-clasificacin>> [Fecha de consulta: 22 de febrero de 2017]

GHODRAT, M. QI, Z. KUANG, S.B. JI, L. YU, A.B. Computational investigation of the effect of particle density on the multiphase flows and performance of hydrocyclone. En: Minerals Engineering. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 90 (enero, 2010) p. 55 – 69 [citado en 04 de julio de 2017] Disponible en Science Direct

GUPTA, A. YAN, D. S. Classification. En: Introduction to Mineral Processing Design and Operation. Western: Elsevier B. V, 2006. p. 354 – 398

HARARAH, M.A. ENDRES, E. DUECK, J. MINKOV, L. NEESSE, T. Flow conditions in the air core of the hydrocyclone. En: Minerals Engineering. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 23 (marzo, 2016) p. 295 – 300 [citado en 06 de julio de 2017] Disponible en Science Direct

MARTHINUSSEN, Svein. The Effect of Fluid Viscosity on Hydrocyclone Performance. Master Thesis Process Technology. Bergen: University of Bergen. Department of Physics and Technology, 2011. 112 p. Disponible en línea: <<http://bora.uib.no/bitstream/handle/1956/5138/85304051.pdf?sequence=1>>

NEESSE, Th. SCHNEIDER, M. DUECK, J. GOLYK, V. BUNTENBACH, S. TIEFEL, H. Hydrocyclone operation at the transition point rope/spray discharge. En: Minerals

Engineering. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 17 (enero, 2004) p. 733 – 737 [citado en 27 de julio de 2017] Disponible en Science Direct

NI, Long. TIAN, Jinyi, ZHAO, Jianing. Experimental study of the effect of underflow pipe diameter on separation performance of a novel de-foulant hydrocyclone with continuous underflow and reflux function. En: Separation and Purification Technology. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 171 (julio, 2016) p. 270 – 279 [citado en 29 de marzo de 2017] Disponible en Science Direct

PERRY, Robert H. Editado por Antonio García Brage. Equipos y Operaciones Sólido – Sólido. En: Manual del ingeniero químico. 7 ed. Vol 3. Madrid: McGraw-Hill, 2001. p. 19-29 – 19-31

Reciclado de laminillo de laminación y colada continua [En línea]. <https://www.alacero.org/es/system/files/asset_tecnologia/reciclado_de_laminillo_de_laminacion_y_colada_continua.pdf> [Fecha de consulta: 01 de agosto de 2017]

SVAROVSKY, Ladislav. Hydrocyclones. En: Solid – Liquid Separation. 4 ed. Pardubice: Butterworth-Heinemann, 2000. p. 193 – 243

TRAWINSKI, Helmut. Aplicaciones y funcionamiento práctico de los hidrociclones. Adaptación de ERAL S.A. 1973. [En línea]. <<https://es.scribd.com/document/48229144/Aplicaciones-y-funcionamiento-practico-de-los-hidrociclones>> [Fecha de consulta: en 12 de septiembre de 2016]

WILLS, B.A. Classification. En: Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 8 ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2016. p. 203 – 217

YANG, Q. WANG, Hua-lin. LIU, Yi. LI, Zhi-ming. Solid/liquid separation performance of hydrocyclones with different cone combinations. En: Separation and Purification Technology. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 171 (junio, 2010) p. 271 – 279 [citado en 2 de julio de 2017] Disponible en Science Direct

YOSHIDA, Hideto. TAKASHINA, Toru. FUKUIA, Kunihiro. IWANAGA, Takeshi. Effect of inlet shape and slurry temperature on the classification performance of hydrocyclones. En: Powder Technology. Elsevier [base de datos en línea]. Vol. 140 (diciembre, 2003) 9 p [citado en 2 de julio de 2017] Disponible en Science Direct

ANEXOS

Datos para la construcción de la curva de rendimiento.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tamaño (μm)	% Peso		% En Peso de Alimentación		Alimentación Reconstituida	Tamaño Nominal (Media Aritmética)	% De Alimentación a U/F	C
	U/F	O/F	U/F	O/F				
425	34,3	1,2	27,44	0,24	27,68	425	99,13294798	98,9282038
250 - 425	16,8	1,4	13,44	0,28	13,72	337,5	97,95918367	97,4772688
180 - 250	18,4	3,8	14,72	0,76	15,48	215	95,09043928	93,931104
150 - 180	16,6	10,1	13,28	2,02	15,3	165	86,79738562	83,6797428
125 - 150	5,8	20,5	4,64	4,1	8,74	137,5	53,08924485	42,0118193
106 - 125	3,9	21,6	3,12	4,32	7,44	115,5	41,93548387	28,2242283
75 - 106	2,5	18,3	2	3,66	5,66	90,5	35,33568905	20,0659692
-75	1,7	23,1	1,36	4,62	5,98	37,5	22,74247492	4,49901498
Total	100	100	80	20	100			

Las columnas 1,2 y 3, representan el análisis de tamices tanto del underflow como del overflow. La columna 4 se elabora multiplicando los resultados de la columna 2 por 0,80 cuyo valor corresponde al porcentaje de agua que sale por la descarga.

La columna 5, es el resultado de la multiplicación de los valores de la columna 3 por 0,20 (porcentaje de agua en el derrame).

La columna 6 es la sumatoria de los valores de las columnas 4 y 5, Mientras que la columna 8 se elabora a partir de la división de los valores de las columnas 4 y 6. La curva de rendimiento es el resultado de graficar la columna 8 versus la columna 7.

La curva se corrige mediante la aplicación de la ecuación (2):

$$C = \frac{S - R_w/u}{1 - R_w/u}$$

Donde el valor de S es el porcentaje de alimentación U/F y R_w/u se obtiene de la siguiente manera:

$$\frac{R_w}{u} = \frac{U/F - Du}{100 - DF}$$

$$\frac{R_w}{u} = \frac{80 - 1,81}{100 - 11,65} = 0,191029024$$

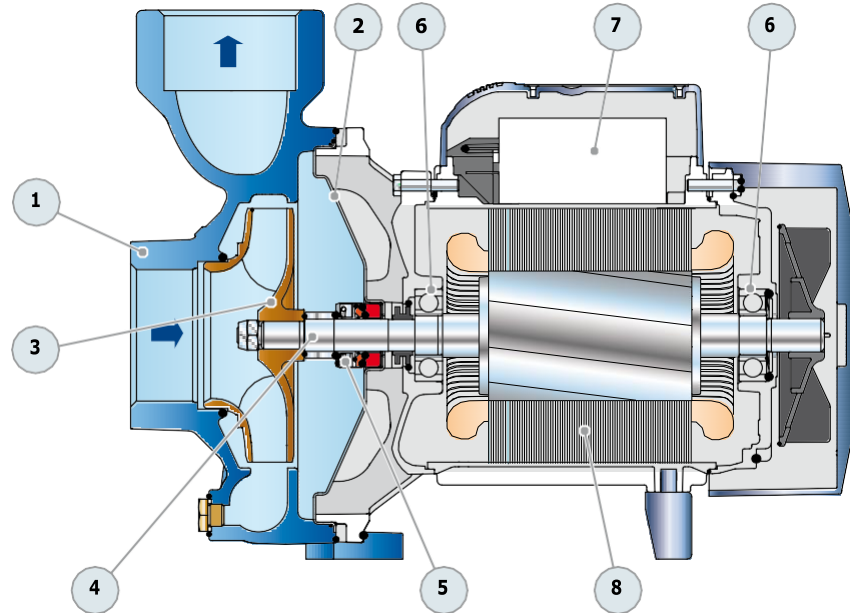
INSTRUCCIONES DE USO

1. Antes de operar la bomba, comprobar que por lo menos una de las válvulas se encuentre abierta.
 2. Verificar las demás conexiones. Es posible que después de largos periodos de inactividad la bomba no opere de manera adecuada por lo que es necesario utilizar solamente agua mientras se regula el flujo.
 3. Se debe preparar la pulpa identificando el contenido de agua y la concentración de sólidos a utilizar.
 4. Tras encender la bomba se debe abrir la válvula 1 para que se agite la pulpa adecuadamente.
 5. Con la pulpa lista, se debe cerrar la válvula 1 y abrir la válvula 2 de manera simultánea.
 6. Cuando se regule el flujo y la presión de entrada oscile entre (5 y 10 psi), se pueden realizar los ensayos requeridos.
 7. Al finalizar no olvidar desconectar la electrobomba y vaciar el sistema.
- En el caso de que se detecten fallos en la bomba pueden ser debidos a burbujas de aire en la voluta; la bomba debe ser purgada.
 - No se debe superar en ningún caso 10 psi de presión debido a que la electrobomba debe trabajar dentro de la presión establecida por su curva de rendimiento.
 - El sistema presenta dos uniones universales con el fin de obtener una fácil instalación y además para que se pueda realizar la limpieza del mismo de manera que no queden alojados residuos en la electrobomba.
 - El tanque presenta un tapón roscado en la parte inferior, el cual tiene como fin la limpieza del mismo, pueden quedar partículas asentadas allí por lo que es importante una buena agitación de la pulpa.

POS. COMPONENTE

CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS

1	CUERPO BOMBA	Hierro fundido con bocas roscadas ISO 228/1				
2	TAPA	Acero inoxidable AISI 304 (en hierro para HF 5M-70)				
3	RODETE	Latón				
4	EJE MOTOR	Acero inoxidable EN 10088-3 - 1.4104				
5	SELLO MECANICO	<i>Electrobomba</i>	<i>Sello</i>	<i>Eje</i>	<i>Materiales</i>	
		<i>Modelo</i>	<i>Modelo</i>	<i>Diámetro</i>	<i>Anillo fijo</i>	<i>Anillo móvil</i>
		HF 5-51	AR-14	Ø 14 mm	Cerámica	Grafito
						Elastómero
						NBR
6	RODAMIENTOS	<i>Electrobomba</i>	<i>Modelo</i>			
		HF 5-51	6203 ZZ / 6203 ZZ			
7	CONDENSADOR	<i>Electrobomba</i>	<i>Capacidad</i>			
		<i>Monofásica</i>	(220 V)	(110 V o 127 V)		
		HFm 5B	20 µF - 450 VL	60 µF - 300 VL		
8	MOTOR ELECTRICO	HFm: monofásica 220 V - 60 Hz con protección térmica incorporada en el bobinado. HF: trifásica 220/380 V - 60 Hz o 220/440 V - 60 Hz. ➡ Las electrobombas trifásicas están equipadas con motores de alto rendimiento en clase IE2 hasta P2=1.1 kW y en clase IE3 desde P2=1.5 kW (IEC 60034-30) – Aislamiento: clase F				



Fuente: https://www.pedrollo.com/public/allegati/HF%20Medie%20portate_ES_60Hz.pdf